



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

KOMPLEXNÍ SIMULAČNÍ MODEL VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

COMPLEX SIMULATION MODEL OF VIBRATION POWER GENERATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN HARAPÁT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Harapát

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Komplexní simulační model vibračního generátoru

v anglickém jazyce:

Complex simulation model of vibration power generator

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato práce se zabývá vytvoření komplexního simulačního modelu vibračního generátoru. Vibrační generátor je mechatronické zařízení, který bylo vyvinuto pro letecké aplikace na VUT v Brně. Cílem práce je komplexně modelovat magnetické pole tohoto zařízení a model propojit s mechanickým modelem a modelem elektroniky. Tato mezioborové propojení poskytují nové možnosti verifikace a optimalizace této mechatronické soustavy.

Cíle diplomové práce:

1. MKP model magnetické části vibračního generátoru.
2. Mechanický model.
3. Elektromechanická přeměna a elektrický model.
4. Komplexní simulační model pro potřeby návrhu parametrů zařízení dle požadavků aplikace.
5. Naladění parametrů generátoru pro zvolenou aplikaci a simulační ověření generovaného výkonu.

Seznam odborné literatury:

Priya S, Inman DJ: Energy Harvesting Technologies. Springer US, 2009.

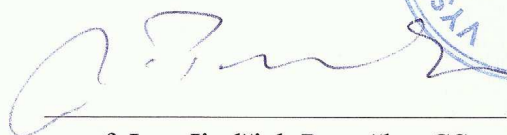
Hadaš, Z.: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.


Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 18.11.2012





prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou současného vývoje v oblasti energy harvesting projektů v leteckém průmyslu a v oblasti vibračních generátorů. Dále se soustředí na vytvoření komplexního simulačního modelu vibračního generátoru. Řeší se zde modelování magnetického pole generátoru a propojení tohoto modelu s mechanickým a elektronickým modelem.

Klíčová slova

Energy harvesting, vibrační generátor, Maxwell, Simplorer, Matlab, letecký průmysl, magnetické pole, elektronika, mechanika, simulace, model

Abstract

This work is focusing on analysis of current development in energy harvesting projects in aerospace industry field, and on analysis of current development in vibration generator field. It is also concentrating on establishment of a complex simulation model of vibration generator. It deals with modeling of magnetic field of generator and its cross connection with a mechanic and an electronic model.

Keywords

Energy harvesting, vibration generator, Maxwell, Simplorer, Matlab, Aerospace Industry, magnetic field, electronics, mechanics, simulation, model

HARAPÁT, J.:KOMPLEXNÍ MODEL VIBRAČNÍHO GENERÁTORU, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Čestné prohlášení

Já, Jan Harapát, prohlašuji, že jsem diplomovou práci Komplexní simulační model vibračního generátoru vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne 24. 5. 2013

.....
Jan Harapát

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D a Ing. Rostislavovi Huzlíkovi za cenné rady a připomínky, kterými přispěli k vypracování této diplomové práce. Chtěl bych také poděkovat svým blízkým za podporu po celou dobu studia.

Obsah

1. Úvod	9
2. Formulace problému a stanovení cílů.....	10
3. Energy harvesting v leteckém průmyslu	11
3.1. Projekty a výzkum v letectví	11
3.1.1. ESPOSA project	11
3.1.2. WISE Project	12
3.1.3. Bezdrátový modul s termoelektrickým generátorem	13
4. Principy vibračních generátorů	15
4.1. Piezoelektrický generátor.....	16
4.1.1. Princip.....	16
4.1.2. Generátor s jedno-dimenzionálním pohybem.....	17
4.1.3. Generátor využívající fononické krystaly.....	17
4.1.4. Generátor inspirovaný stromovou strukturou.....	18
4.2. Elektrostatický generátor	19
4.3. Magnetostrikční generátor	20
4.4. Elektromagnetický generátor	21
4.4.1. Princip.....	21
4.4.2. Generátor pro malé frekvence vibrací	22
4.4.3. Generátor s multi-pólovými magnetickými deskami	23
4.4.4. Generátor vyvinutý na VUT v Brně	23
4.5. Srovnání jednotlivých principů.....	27
5. Vyhodnocení řešení problému	28
6. Software Ansys Maxwell	29

7. Vibrační generátor v programu Maxwell	30
7.1. Sestavení modelu	30
7.1.1. Model geometrie.....	30
7.1.2. Nastavení materiálů	33
7.2. Magnetostatiké simulace.....	34
7.2.1. Optimalizace velikosti tuhostních magnetů.....	35
7.3. Transientní simulace	38
7.3.1. Určení pohyblivých částí.....	38
7.3.2. Nastavení cívky a meshování	39
7.3.3. Mechanický model	40
7.3.4. Komplexní model pro transientní analýzu	42
7.4. Výsledky simulačního modelu.....	43
8. Postup návrhu generátoru pro budoucí aplikace	46
8.1. Vstupní data a požadavky	46
8.2. Návrh rozměrů generátoru	47
8.3. Nastavení tuhostních magnetů	48
8.4. Power management.....	49
8.5. Verifikace modelů.....	50
9. Závěr	51
10. Seznam použité literatury	52

1. Úvod

V rámci neustálého vývoje a hledání nových technologií roste také snaha o zlepšení automatických kontrol a analýz stavu stroje. A to ať už jde o dopravní prostředky nebo různé výrobní stroje. Největší snaha je v leteckém průmyslu a to nejen kvůli potřebě výrazně snížit počet servisních kontrol, které jsou mnohdy nákladné a velice namáhavé vzhledem ke špatné dostupnosti některých součástí, ale především z hlediska bezpečnosti. U těchto strojů může totiž i malá trhlina způsobit tragickou katastrofu.

Systém čidel a senzorů vlastně představuje „nervovou síť“ letadla. Sleduje jeho stav, vlastnosti a monitoruje změny teplot, rázy a další prvky, které ovlivňují výdrž materiálů a tím pádem i životnost letadla.

Se zvyšujícím se počtem snímačů, a tedy se zvyšující monitorovací schopností, se bude nejen snižovat počet potřebných servisních kontrol a zvyšovat bezpečnost, ale také porostou energetické a prostorové nároky na provoz této nervové sítě. Jen pro představu. Nejmodernější stíhací letouny obsahují okolo sto tisíc kilometrů různých drátů. Proto se v současnosti výrazně zvyšuje zájem o energy harvesting systémy, které by vyřešili problémy s napájením, a vše by mohlo probíhat bezdrátově. To sebou přináší ještě jednu významnou výhodu. Takové energy harvesting systémy můžeme umístit tam, kde z různých důvodů nesmí být instalovány vodiče, a díky tomu jsme schopni získat důležité parametry, ke kterým nebylo možné se dřív dostat.

Výsledkem by byl určitý modul, který by obsahoval prakticky neomezený zdroj energie, čidlo a bezdrátový vysílač. Ten by bylo možné umístit na jakoukoliv část stroje a nemusel by se vůbec řešit problém s natahováním kabelů.

2. Formulace problému a stanovení cílů

Problémem u vibračních generátorů je komplexní modelování tohoto mechatronického zařízení a složité navrhování jeho konstrukce. Funkčnost generátoru ovlivňuje mnoho faktorů, pro které je navrhován, a v případě určité změny přestává fungovat. Téměř neexistují obecné nástroje a návody, které by pomáhaly s návrhem konstrukce nových generátorů a které by umožnily zrychlení celého procesu.

Práce se zaměřuje na sestavení původního modelu vibračního generátoru a jeho převedení do programu Ansys Maxwell.

Cílem práce je tento MKP model inovovat a parametrizovat tak, aby ho bylo možné automaticky upravovat podle požadavků na jeho konstrukci. Takovýto komplexní model kromě mechanické části obsahuje i magnetický a elektrický model. Všechny tyto modely jsou vzájemně provázané.

Na závěr bude shrnut celý proces návrhu generátoru tak, aby byl co nejvíc zautomatizován a zjednodušen. Tím se zredukuje doba tohoto návrhu a urychlí jeho nasazení do praxe.

3. Energy harvesting v leteckém průmyslu

V současné době se energy harvesting systémy začínají zapracovávat do různých typů zařízení. Díky tomu se nejen sníží energetické nároky, ale i zjednoduší konstrukce nahrazením velkého množství vodičů bezdrátovou komunikací. Navíc bez nutnosti měnit baterie. To má především významný vliv u letadel, kde je současný monitorovací systém napájen a komunikován pomocí značného množství vodičů, což způsobuje náročnou instalaci.

3.1. Projekty a výzkum v letectví

Zde je vybraných několik technologií a projektů, které se týkají právě leteckého průmyslu. Články a vědecké publikace byly získány z databáze Scopus [27].

3.1.1. ESPOSA project

Projekt se zabývá efektivními systémy a pohony pro malá letadla. ESPOSA je zkratka z názvu *Efficient Systems and Propulsion for Small Aircraft*. Vznikl v roce 2011 a stále pokračuje. Informace byly získány ze zdroje [24]. Na projektu spolupracuje několik českých (Evektor, Honeywell, První Brněnská Strojírna, Unis, VUT v Brně a Výzkumný a zkušební letecký ústav) a desítky zahraničních firem.

Motivací vzniku byl fakt, že na trhu je v současné době pouze velmi omezený výběr motorů s výkonem do 1000 kW. Navíc ty motory, které jsou cenově přijatelné, jsou příliš zastaralé a mají vyšší provozní náklady. Oproti tomu novější modely sice disponují moderními technologiemi, ale jejich pořizovací náklady jsou příliš vysoké na to, aby mohly být využívány v širším rozsahu. Pro nejmenší letadla (s kapacitou 2-5 cestujících) prakticky neexistují nové modely, které by využívaly moderní technologie a používají se klasické pístové motory.

Cílem projektu je vyvinout a prosadit nové technologie pro skupinu menších turbovrtulových motorů s výkonem přibližně 180kW až 450kW. Projekt se nezabývá pouze motory, ale také prvky, které s nimi souvisí. Jde o systémy, které budou zvyšovat celkovou účinnost a bezpečnost. Zároveň zahrnuje snahu snížit pracovní zatížení pilota. Velký důraz je kladen na nízké provozní náklady a přijatelnou pořizovací cenu, což souvisí především se zvýšením intervalu technických prohlídek a výběrem vhodných materiálů a konstrukce. Ohled je brán také na ekologické aspekty.

3.1.2. WISE Project

Tento projekt startoval začátkem roku 2005 a spolupracovalo na něm několik evropských firem a univerzit, včetně VUT v Brně. Obecně se tento projekt zabýval integrováním bezdrátových technologií do letadel tak, aby jejich napájení bylo autonomní. Informace a detaily byly získány z publikace [23]. Nejprve bylo potřeba navrhnout 3 typy bezdrátových technologií:

- Přenos vzduchem na radiových frekvencích pro bezdrátové nabíjení (do 30cm).
- Přenos na dlouhých radiových frekvencích nejen skrze vzduch, ale také kovové a kompozitní části tak, aby byla zajištěna komunikace v celém letadle.
- Ultrasonické technologie zajišťující přenos energie a komunikaci skrz kovový plášť letadla.

Hlavními cíly projektu bylo vytvořit:

- Bezdrátové zařízení měřící teplotu pro systém, který zabráňuje tvorbě ledu na letadle. Napájení bude probíhat bezdrátově.
- Systém pro sledování stavu kyslíkových bomb, též s bezdrátovým napájením.
- Zařízení monitorující teplotu sání motoru pracující také bezdrátově. O napájení se bude tentokrát starat generátor vytvářející energii z vibrací.

Výsledky byly poté testovány na letounu Dassault Falcon 7X a vrtulníku NH90.



Obr. 1: Dassault Falcon 7X [25] a vrtulník NH90 [26]

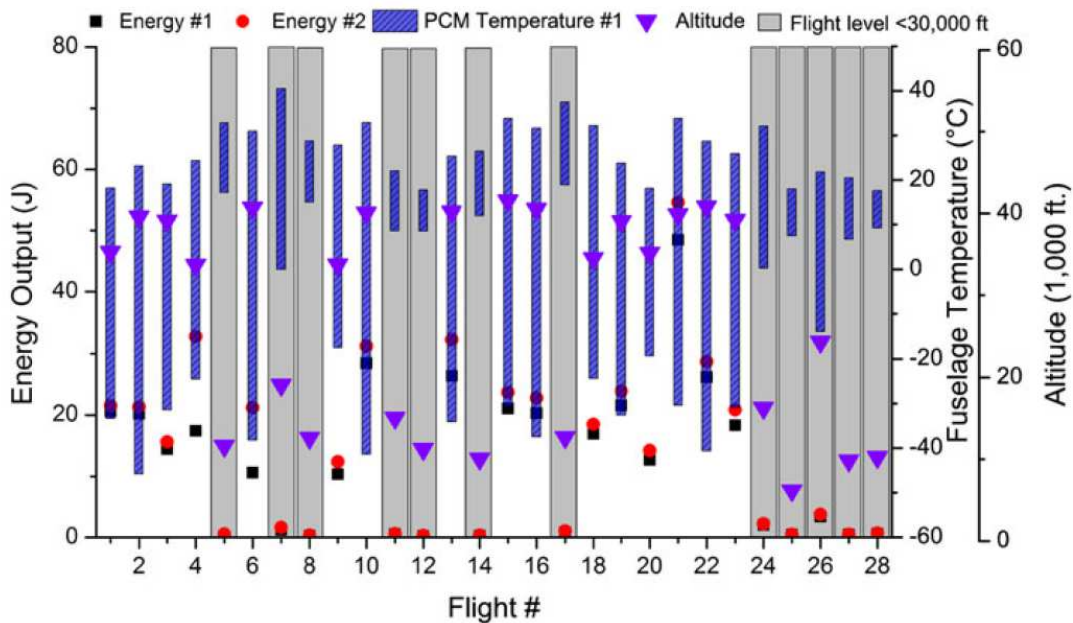
V projektu se potvrdilo, že bezdrátové technologie jsou pro některé aplikace v letectví užitečné a reálně využitelné. Také se ukázalo, že vyvinuté technologie umožní zjednodušení některých konstrukčních postupů a tím i snížení výrobních nákladů. Nedosahují ale tak nízké poruchovosti jako v případě drátové komunikace, takže se s jejich nasazením počítá hlavně na méně rizikových místech, kde není nutná tak vysoká spolehlivost a velká vzorkovací frekvence, s níž rostou energetické nároky.

Je také potřeba myslet, na to, že pro komunikaci a bezdrátové nabíjení nelze použít WIFI kvůli interferenci s palubními systémy. Totéž platí pro frekvence, které jsou již využívány jinými zařízeními. Ze závěru tedy vyplývá, že bezdrátové systémy můžeme použít například pro dočasné senzorové sítě, které se používají například při vývoji, testování nebo při technických kontrolách, taktéž u komunikace mezi leteckým personálem, infrastrukturou a cestujícími. Třetí možností jsou systémy a senzory s nízkou vzorkovací frekvencí a ty, kde je instalace vodičů příliš náročná nebo nemožná.

3.1.3. Bezdrátový modul s termoelektrickým generátorem

Práce s originálním názvem *Aircraft-Specific Thermoelectric Generator Module* z roku 2009 vyhodnocuje využití termogenerátoru pro napájení autonomních bezdrátových senzorů. Více informací je k nalezení v publikaci [3]. Testování probíhalo v rámci hodinového letu a rozdíl teplot mezi vnitřním a venkovním prostředím letadla se pohyboval do 40°C (-20°C až +20°C vně a +20°C uvnitř). V závěru se potvrdilo, že i termoelektrický generátor lze využít pro zajištění napájení bezdrátových senzorových modulů. V poměru hmotnosti termogenerátoru vzhledem k výkonu bylo dosaženo hodnoty 3,5K gW^{-1} , která je dostatečná k tomu, aby se mohl takový generátor začít reálně využívat. Návrh prototypu byl ale značně omezen. Další výzkum by přinesl větší shodu mezi experimentálním testováním a simulačním modelem a tím i lepší výsledky. Jde především o započítání ztrát z takzvaného prosakování energie, kterou generátor nedokázal využít.

Stejní autoři se později podíleli na práci s názvem *Investigation of the Performance of Thermoelectric Energy Harvesters Under Real Flight Conditions*. Detailní informace byly získány publikací [4]. Práce byla vydána v roce 2013 a je tedy stará jen pár měsíců. Byly analyzovány měření z 28 testovacích letů, které proběhly v průběhu roku 2011. Zde se ukázalo, že výrazný vliv měla letová výška. Pro to, aby byl potřebný efekt dosažen vždy, by měl letoun udržovat výšku okolo 30 000 stop (přibližně 9 100m). Vše je zřetelně vidět na obr. 2. Jsou zde zaznamenány výsledky všech 28 letů. Šedou barvou jsou vyznačeny ty, u nichž se nepodařilo udržet dostatečnou letovou výšku. Červenou tečkou a černým čtvercem je znázorněno, kolik energie bylo získáno u dvou typů generátorů. Je zřejmé, že bez potřebné letové výšky (šedé sloupce) bylo množství generované energie minimální. Fialové trojúhelníky znázorňují průměrnou letovou výšku a modré čáry vyjadřují rozmezí, v kterých se pohybovala teplota trupu letadla.



Obr. 2: grafické zobrazení výsledků zaznamenaných při jednotlivých letech [4]

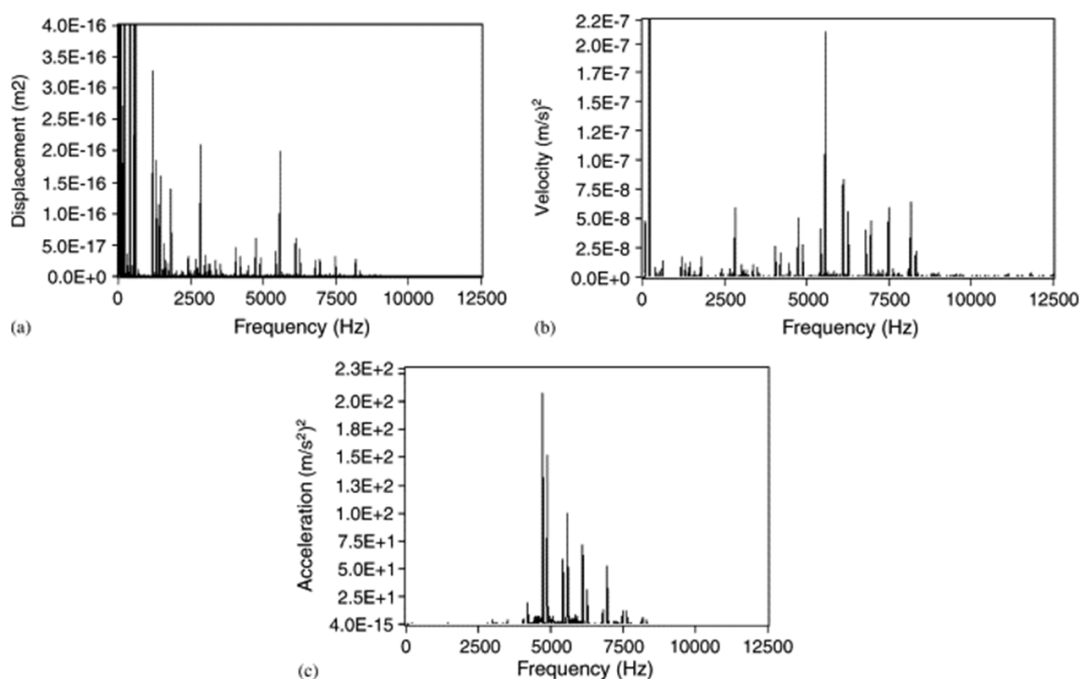
Celková délka letu od startu až po přistání se pohybovala okolo 80min. U letů s dostatečnou výškou bylo průměrně vytvořeno 20,89J u prvního generátoru a 24,74J u druhého generátoru. Takové množství energie by dokázalo napájet běžný bezdrátový senzor po dobu více než 6h.

4. Principy vibračních generátorů

Vibrační generátory jsou jedním z předních cílů, na které se vývoj v oblasti energy harvesting zaměřil. Vibrace jsou totiž všudypřítomné a principy jejich využití jsou docela jednoduché. Využívá se zde především kritických vibrací. Musí se tedy zjistit která frekvence je v daném okolí dominantní. Generátor se poté sestaví tak, aby právě tato byla kritická frekvence generátoru. Generátor se díky tomu rozkmitá mnohem výrazněji oproti amplitudě, kterou mají budící vibrace. Má to ale zásadní omezení. Takový generátor dokáže pracovat právě jen na určité konkrétní frekvenci, a pokud ho přemístíme do jiného prostředí, pravděpodobně nebude fungovat. Řešení, jak zajistit větší rozsah využitelných vibrací u jednotlivých generátorů, je právě v intenzivním vývoji. Několik nových technologií a vylepšení již bylo objeveno. Některé z nich jsou zmíněny výše, kde je rozebráno několik projektů z poslední doby.

V současnosti je při návrhu generátoru potřeba brát v úvahu několik faktorů, kterým se musí přizpůsobit velikost a rozměry. To je kromě frekvence okolních vibrací i jejich amplituda a samozřejmě také požadovaný výstupní výkon generátoru.

Na obr. 3 je ukázka naměřených dat a jejich znázornění po Fourierově transformaci. Měření proběhlo na elektromotoru. Z těchto měření získáme potřebné údaje, jako jsou dominantní frekvence, jejich amplitudy a zrychlení.



Obr. 3: ukázka naměřených dat na elektromotoru [16]

Vibrační generátory můžeme rozdělit podle principů, které využívají pro získání energie z okolních vibrací. Každý z těchto principů má určité výhody a nevýhody, a každý z nich je vhodný pro jinou aplikaci. Informace o rozdělení a jednotlivých generátorech byly získány z publikací [2] a [9].

Celosvětově existuje hodně firem, které již vyrábí různé typy energy harvesting generátorů a samozřejmě je dále vyvíjí. Patří mezi ně například Smart Material, Solid-state Research inc., Texas Instruments, Ambio Systems, KCF technologies, Ferro Solutions, Midé, Perpetuum a další. Nejzajímavější projekty poslední doby jsou popsány u jednotlivých typů generátorů.

4.1. Piezoelektrický generátor

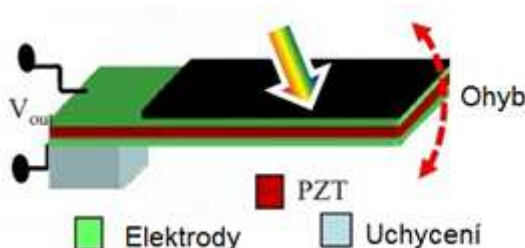
4.1.1. Princip

Piezoelektrický jev byl objeven v roce 1880 bratry Pierre a Jacques Curieovými. Zjistili, že při deformování určitých speciálních krystalů (jde především o látky, které nemají střed souměrnosti jako např. křemen, sfalerit, atd.) vzniká na jejich povrchu elektrický náboj.

Vibrační generátor využívající tento princip je konstrukčně velmi jednoduchý a je tedy možné ho využít jako mikro-generátor. Nejčastěji je tvořen nosníkem z pružného materiálu (např. ocel), na němž jsou připevněny piezokeramické pláty. Na konci nosníku je připevněno těleso o určité hmotnosti, které zvyšuje výkmity a tím i výkon.

Využití piezoelektrického materiálu můžeme vidět také například u akcelerometrů, kde se vlivem setrvačnosti stlačuje nebo naopak natahuje piezokeramická destička.

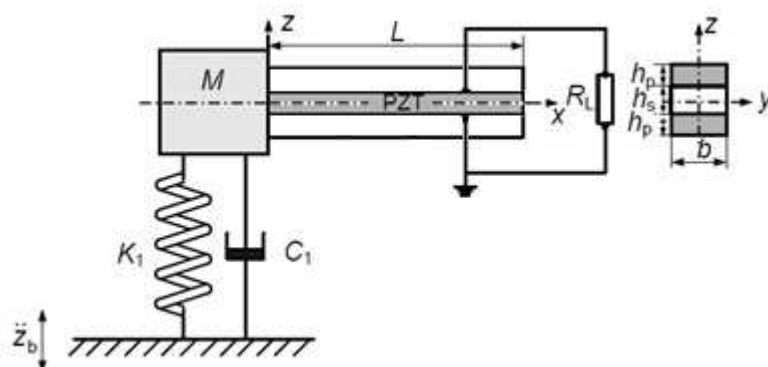
Do současnosti bylo vytvořeno mnoho metod jak vylepšit generátory. Ty by se daly rozdělit do dvou skupin. V první kategorii jsou metody, které pracují na tom, jak přizpůsobit rezonanční frekvenci jednotlivých generátorů tak, aby byly naladěny na dominantní frekvenci v daném okolí. Druhým směrem je vytvoření širokopásmového generátoru, kde figurují nelineární piezoelektrické generátory. Ty jsou považovány za slibný směr vývoje.



Obr. 4: piezoelektrický generátor využívající kmitání volného konce [18]

4.1.2. Generátor s jedno-dimenzionálním pohybem

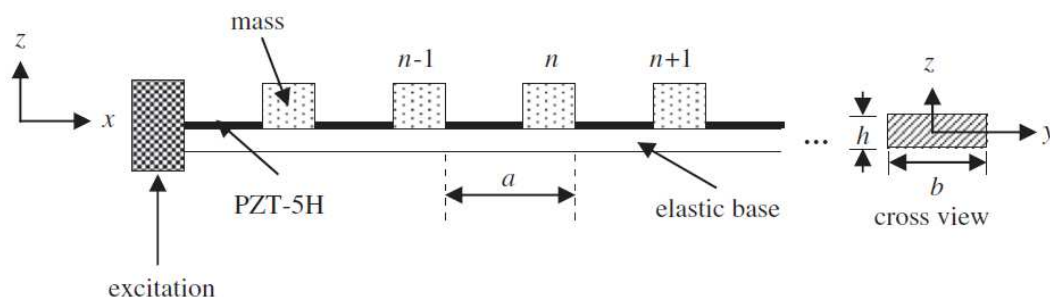
Tento generátor patří mezi nejpoužívanější. Informace byly získány v publikaci [15] pocházející z roku 2012. Generátor kombinuje piezoelektrický materiál uchycený na pružném nosníku s dodatečným závažím. Na jedné straně je nosník vetknutý a na druhé straně volný. Ohyb je možný pouze v jednom směru. Bude-li naladěn na okolní vibrace, tak se rozkmitá a namáhaný piezoelektrický materiál začne generovat energii. Zjistilo se, že výrazný vliv na zvýšení výkonu má nejen vhodně zvolený elastický nosník, ale také co největší koncentrace hmotnosti do koncového volného bodu. Zároveň je důležité co nejmenší tlumení. Z výsledků vyplývá, že pro dostatečně velký výstupní výkon je zásadní, aby byl hmotností poměr mezi konzolou a koncovým závažím nižší než 0,105.



Obr. 5: schéma základního piezoelektrického generátoru s jedním stupněm volnosti [15]

4.1.3. Generátor využívající fononické krystaly

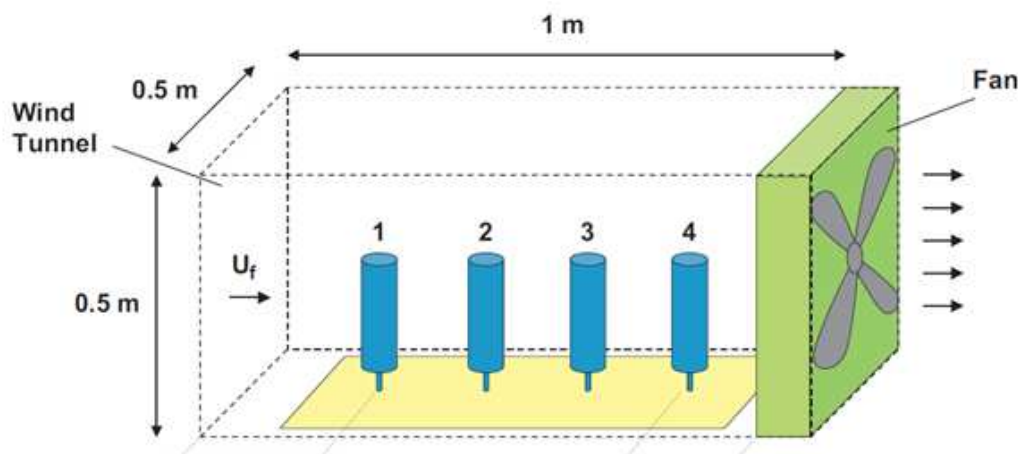
Tyto širokopásmové piezoelektrické vibrační generátory pracují na principu jedno-dimenzionálních konzol s fononickými krystaly. Informace byly získány v publikaci [6] pocházející z roku 2012. Přínosem této práce je rozšíření rezonančního pásma piezoelektrických generátorů, které využívají fononické krystaly (jedná se o strukturu, která brání šíření vln v určitém kmitočtovém pásmu). Běžné piezoelektrické generátory totiž dokážou účinně pracovat pouze ve velice úzkém pásmu rezonance. Přitom je běžné, že okolní vibrace nemají výrazně dominantní frekvenci a mají široké spektrum. Fononickými materiály lze uměle řídit charakteristiky šíření vln v pružných tělesech. Díky tomu, že fungují jako filtry pro mechanické vlnění, se vibrační energie rozdělí do jednotlivých pásem. Můžeme tak ovlivnit, které vibrace budou působit na jednotlivé hmoty. Díky tomu můžeme celé zařízení nastavit tak, aby využívalo mnohem širší spektrum vibrací.



Obr. 6: schéma jedno-dimenzionální fononicko-piezoelektrické konzoly [6]

4.1.4. Generátor inspirovaný stromovou strukturou

Informace byly získány v publikaci [8] pocházející z roku 2011. Probírá se zde zařízení inspirované pohybem stromů ve větru. To se skládá ze čtyř válců připevněných k podložce přes elastické piezoelektrické tyčky. Okolo nich rovnoměrně proudí vzduch. Celý experiment je znázorněný na obr. 7. Jedná se sice o zařízení příliš velké na to, aby ho bylo možné použít pro letectví a různé senzorové systémy, ovšem konstrukce není nijak složitá. Určitě by tedy bylo možné vytvořit generátor přijatelných rozměrů. Důležité je, kolik energie by dokázal vytvořit.



Obr. 7: schéma piezoelektrického energy harvesting zařízení využívající proudění okolního vzduchu [8]

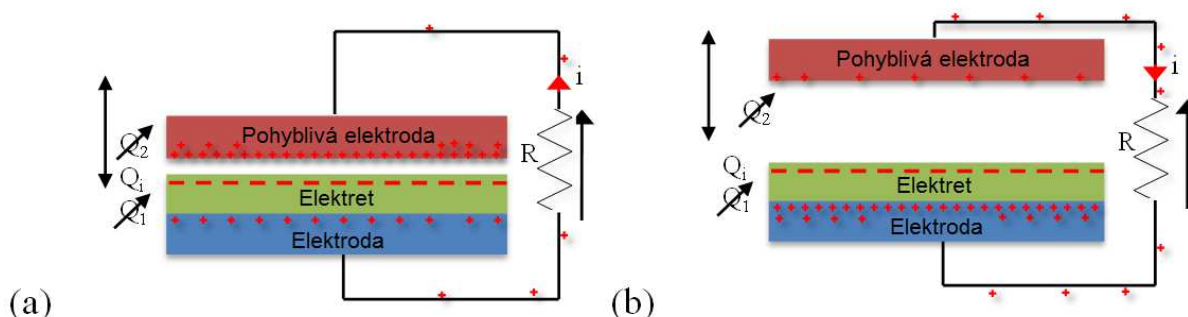
Výstupní výkon z každého ze čtyř zařízení se pohyboval od 1 do 5 μW . To je v porovnání s větrnými turbínami o stejném průřezu velice málo. Turbína by dokázala vytvořit zhruba 0,01 - 0,1W výkonu. Piezoelektrický les má ale pár výhod. Hmotnost válců použitých pro tento experiment byla pouze 10g. Ani zdaleka není potřeba tak častá údržba a vzhledem k jednoduchosti se dá i výrazně zmenšit. Lze vycházet z toho, že maximální výkon na plochu průřezu je $0,3\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

4.2. Elektrostatický generátor

Generátor využívá jednoduchého principu elektrostatické indukce. Jedná se o jev, kdy v případě, že přiblížíme k prvnímu tělesu jiné elektricky nabitě těleso, tak se na povrchu prvního tělesa vytváří (indukuje) elektrický náboj. U vodičů lze tento indukovaný náboj odvést. Tento princip se využívá především u kondenzátorů, kde dvě elektricky nabitě destičky vzájemně indukují elektrické náboje a díky tomu je možné tento náboj po určitou dobu mezi destičkami uchovat.

I u generátoru jde většinou o soustavu dvou destiček, které mají elektrický náboj (elektrody) a jsou oddělené dielektrikem. Na rozdíl od kondenzátoru destičky tohoto generátoru nemají fixovanou vzájemnou polohu a mohou se pohybovat. Tento vzájemný pohyb vytvářejí vibrace a z důvodu neustálých změn vzdálenosti mezi destičkami se na nich indukují elektrická energie, která se poté odvádí.

Konstrukce takového generátoru je velmi jednoduchá a je tedy vhodný pro použití v MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Dokáže využívat vibrace s frekvencí až několik kHz. Nevýhodou je, že potřebuje elektrický impuls k tomu, aby začal fungovat. Musí se nabít počátečním nábojem. Druhou nevýhodou je nízký výkon. Impuls potřebný pro rozběh bývá nejčastěji zajištěn kondenzátorem, který se nabije jako první, aby měl dostatečný náboj pro další start.

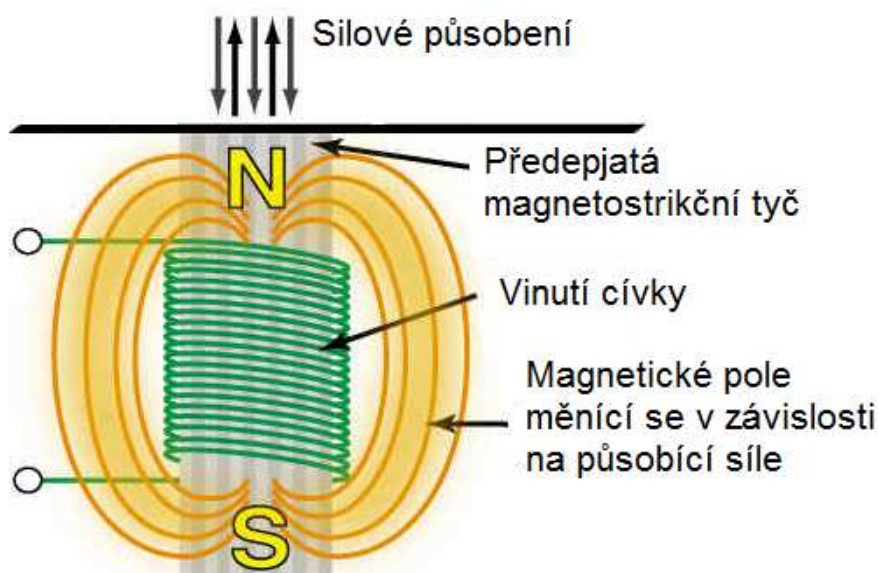


Obr. 8: schéma principu elektrostatického vibračního generátoru [17]

V publikaci [10] se rozebírá speciální řešení a to kombinací elektrostatického a malého piezoelektrického generátoru. Díky této kombinaci není potřeba zapojovat do soustavy speciální startovací kondenzátor a používat *flyback* převodník, který slouží k zamezení ztrát na kondenzátorech. Tím se zjednoduší obvody a zvýší účinnost.

4.3. Magnetostrikční generátor

Magnetostrikční jev lze uplatnit pouze u feromagnetických materiálů. Magnetostrikce v zásadě vychází ze dvou dalších jevů a to z Wiedermannova a z Vilariho jevu. Magnetostrikční tyč musí být magneticky zkreslena pomocí permanentních magnetů (bez toho by nebyla tyč zmagnetizována v axiálním směru a k žádnému buzení by nedošlo) a musí být mechanicky předepjatá (a to alespoň o velikosti amplitudy vibrací). Magnetizace v určitém směru se pak bude měnit tím, jak budeme na tyč působit vibracemi. Změny proudění v tyči budou indukovat elektrické napětí v cívce, která je na tyči navinutá. Výkonová hustota může dosahovat středních hodnot až $60\text{mW}/\text{cm}^3$. Podrobnější informace o tomto typu generátoru se nachází v publikaci [11].



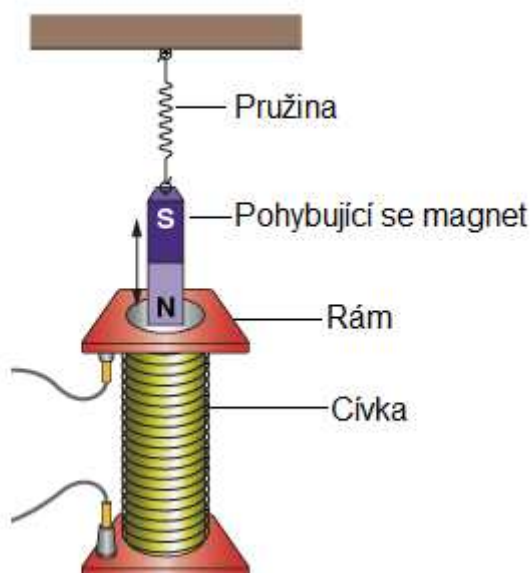
Obr. 9: schéma magnetostrikčního vibračního generátoru [21]

4.4. Elektromagnetický generátor

4.4.1. Princip

Tento generátor využívá principu přeměny energie na základě Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Zákon říká následující. Máme-li uzavřený elektrický obvod, na který působíme měnícím se magnetickým indukčním tokem, bude se v tomto obvodu indukovat elektrické napětí. Jednoduše řečeno: pokud budeme pohybovat magnetem v okolí cívky, bude se na cívce indukovat napětí.

Přesně tohoto principu využívá elektromagnetický vibrační generátor. Jeho možné zapojení je vidět na obr. 10, kdy je cívka pevně ukotvena a pohybuje se magnet. Může to být samozřejmě i obráceně, ale zde by se objevily problémy s připojením pohybující se cívky do obvodu.



Obr. 10: schéma možného zapojení elektromagnetického vibračního generátoru [20]

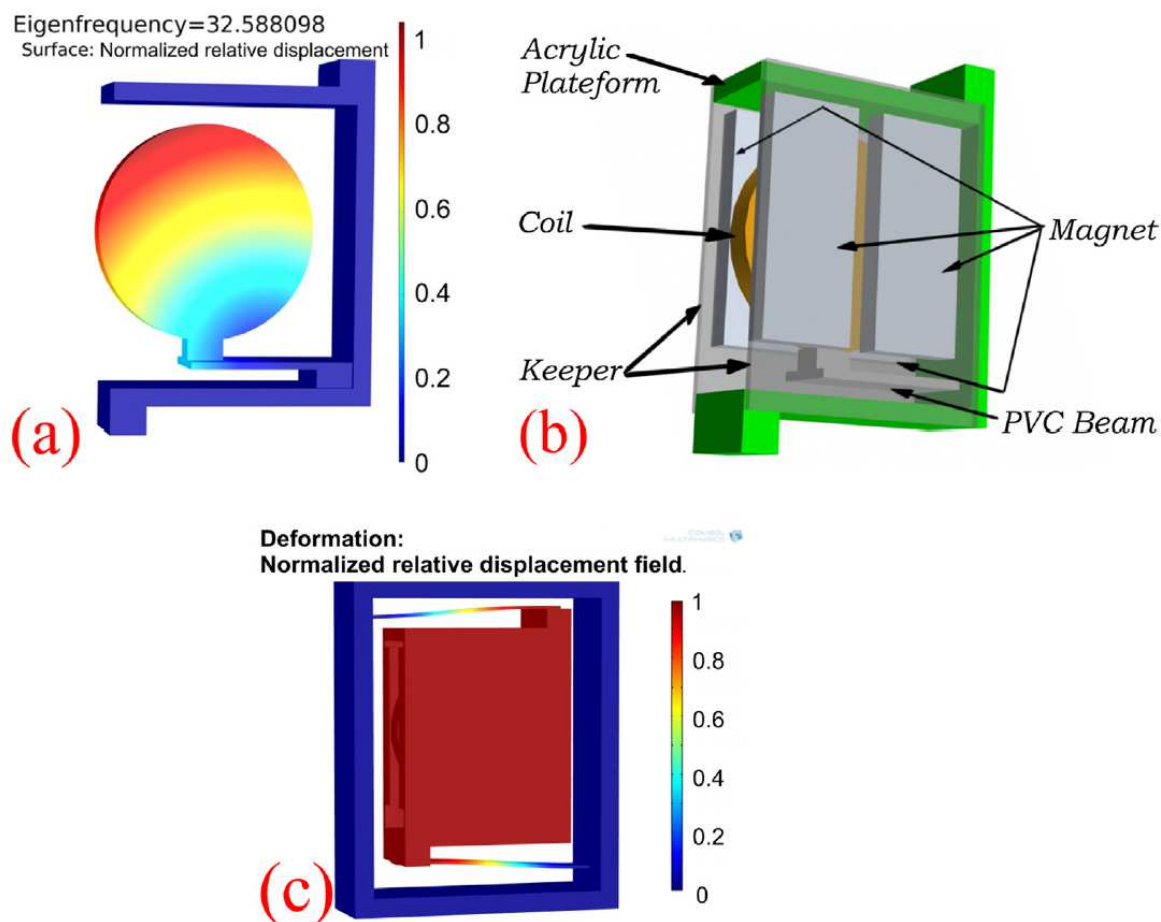
Při návrhu generátoru je potřeba se zaměřit na zajištění co největší změny magnetického toku, který prochází cívkou a také aby tato změna působila na co největší ploše cívky. Prakticky to znamená vybrat správný typ a velikost magnetů, a také rozměry a počet závitů cívky.

Tento generátor je vhodný pro nižší frekvence přibližně do 100Hz. Z fyzikálního hlediska nejsou rozměry nijak limitovány a je tedy možné vytvořit větší generátor pro případy kde je požadován vyšší výkon. Nevýhodou generátoru je obecně nízké napětí.

4.4.2. Generátor pro malé frekvence vibrací

Informace byly získány v publikaci [7] pocházející z roku 2012. Zkoumá možnosti ovlivňování frekvencí a jejich konverzi na vyšší kmitočty. Tím by se dosáhlo větší účinnosti a zároveň širšího rozsahu využitelných nízkofrekvenčních vibrací.

Schéma vysokofrekvenční části generátoru je vidět na obr. 11(a). Celý generátor je znázorněn na obr. 11(c). Ten se skládá ze dvou částí citlivých na vibrace, které jsou spolu spojeny sériově. Druhá, vnitřní část je cívka.

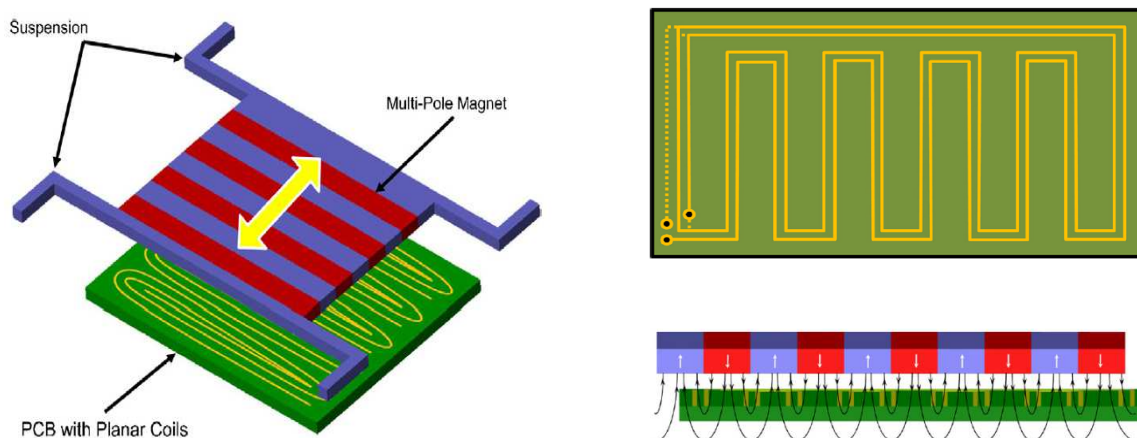


Obr. 11: schémata generátoru a jeho částí [7]

Následné testy potvrdily, že zvýšení frekvencí může zajistit vyšší účinnost a širší rozsah využitelných vibrací. Také lze efektivně využít i zdroje, kde je energie rozdělena do několika harmonických. Průměrná výkonová hustota se pohybovala okolo $183,34 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ při frekvenci 10,3Hz. Výsledky byly příznivé i při předběžném zkoumání získávání energie z ještě nižších vibrací.

4.4.3. Generátor s multi-pólovými magnetickými deskami

Informace byly získány v publikaci [5] pocházející z roku 2012. Vychází se z toho, že v současnosti se příliš neřeší tvar. Energy harvesting zařízení se konstruuje většinou téměř ve tvaru krychle nebo širokého válce. Implementace takových těles je mnohem složitější, než kdyby se jednalo o plochá zařízení. Cílem bylo vytvořit rovinné zařízení, které bude využívat multi-pólovou desku a cívku ve formě levných tištěných obvodů. V případě jejich vzájemného pohybu, tak jak je naznačeno na obr. 12, se bude na cívce indukovat proud. Zařízení může generovat elektrickou energii buď z vibrací, nebo od sil působících v ose pohybu. Rozměry prototypu byly 37x37x3mm a účinnost přibližně 9%.



Obr. 12: grafické znázornění vzájemné polohy vrstev, uspořádání cívky a působení magnetických sil [5]

Snahou je snížit vzduchovou mezeru mezi cívkou a magnetem na minimum, což má výrazný vliv na výkon. U tohoto prototypu se to dařilo až do vzdálenosti 0,1mm. S dalším snižováním vzduchové mezery a snahou snížit pohybové tření lze dosáhnout účinnosti až do 20%.

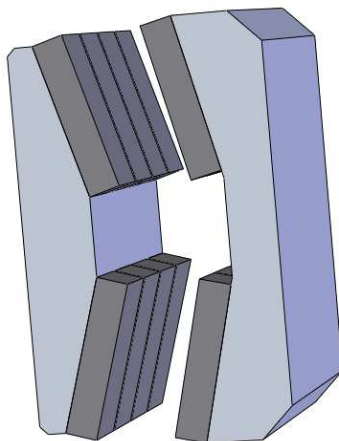
4.4.4. Generátor vyvinutý na VUT v Brně

Informace byly získány v publikaci [2] pocházející z roku 2007. Tento generátor byl využit v mnoha dalších publikacích a několikrát upravován. Proto zde bude popsán detailněji.

Budicí obvod

Velikost budicího obvodu má majoritní podíl na hmotnosti kmitající soustavy, na což se musí při návrhu brát ohled. Skládá se většinou z několika permanentních magnetů a pólových nástavců. U magnetů je důležité správně zvolit nejen jejich velikost, ale také typ. Jako nejvhodnější se jevíly neodymové magnety tvořené vzácnými zeminami NdFeB, které jsou nejsilnější na trhu.

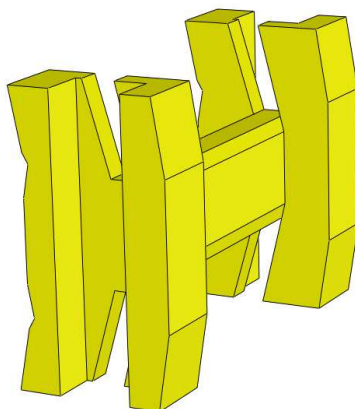
Při uspořádání magnetů podle obr. 13 je průměrná magnetická indukce v mezeře 0,45T. Působení této indukce na cívku je závislé od velikosti výkmitu a od toho, jak velká plocha cívky se bude v průběhu rezonance nacházet přímo mezi magnety. Pro tento model byly zvoleny neodymové magnety o rozměrech 4x5x2 mm s magnetováním ve směru kolmém k největší ploše.



Obr. 13: model výchozího magnetického obvodu [2]

Cívka

Důležité je též správně zvolit délku vodiče, na kterém se bude indukovat napětí. Délka a tloušťka musí být nastavena tak, aby se dosáhlo maximálního výkonu. Jako vhodná byla zvolena konstrukce obdélníkové cívky bez jádra. Kostra cívky, která je na obr. 14 zbarvena žlutě, byla vytvořena metodou RAPID prototype. U této metody jde prakticky o 3D tisk nanášením vrstev plastické hmoty. Cívka na samotnou kostru musela být poté navinuta ručně. Koeficient plnění této cívky je přibližně 50% a byl zvolen lakovaný měděný drát o průměru 50 μ m. Navinutá cívka má 1200 závitů s vnitřním odporem 550 Ω .

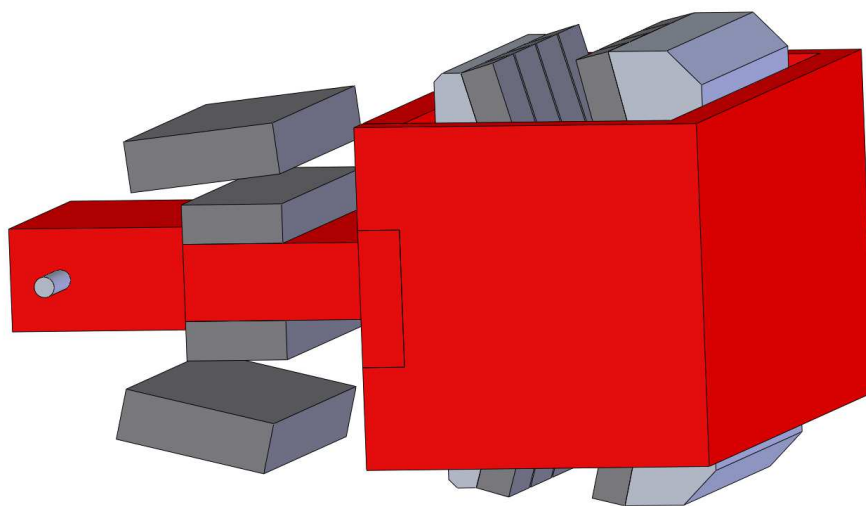


Obr. 14: model nosné konstrukce cívky [2]

Rezonanční mechanismus

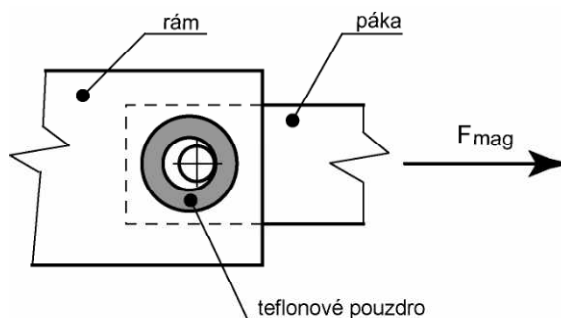
Zvažovalo se mnoho způsobů jak řešit rezonanční mechanismus. Těleso může být zavěšeno na některé z mnoha druhů pružin, připevněno na vetknutém nosníku, pružinové membráně, nebo fixováno k sadě odpuzujících se magnetů. Z hlediska doladování generátoru a z důvodu omezení ztrát od mechanického tlumení byla nakonec vybrána jako nejlepší varianta sada odpuzujících se magnetů. Z důvodu absence pružného členu se zvýšila životnost. Doladit generátor lze jednoduše posunutím magnetů nebo přilepením přídavné hmoty. Určitou nevýhodou je, že tyto úpravy nelze dělat za provozu.

Cílem je vybrat magnety tak, aby se za chodu téměř dotýkaly. Jejich ideální rozměry byly stanoveny na 14x5x2mm s magnetováním opět ve směru kolmém k největší ploše.



Obr. 15: model rezonančního mechanismu s připevněným magnetickým obvodem [2]

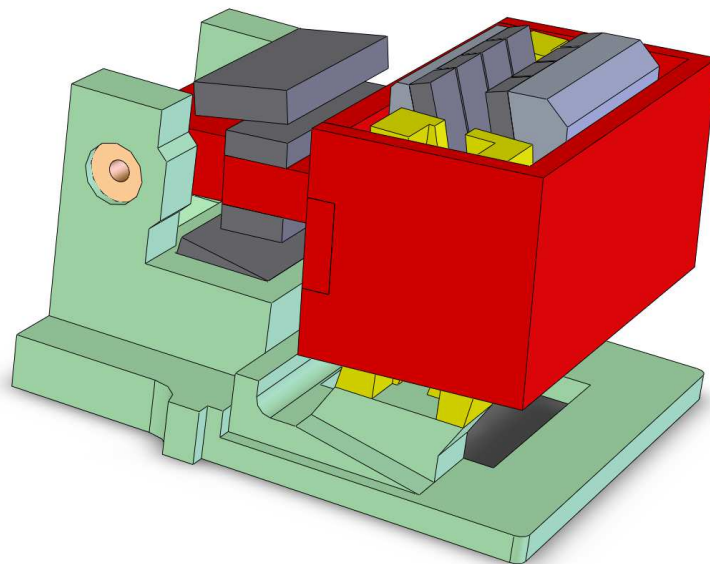
Kluzné pouzdro bylo navrženo tak, aby třecí síly byly minimální. Graficky je znázorněno na obr. 16. Průměr osy byl stanoven na 1,6mm a vnitřní průměr pouzdra na 2mm. Z důvodu nízkého tření byl jako materiál pouzdra vybrán teflon. Působení magnetů dává dostatečnou sílu pro zajištění odvalování osy v pouzdře.



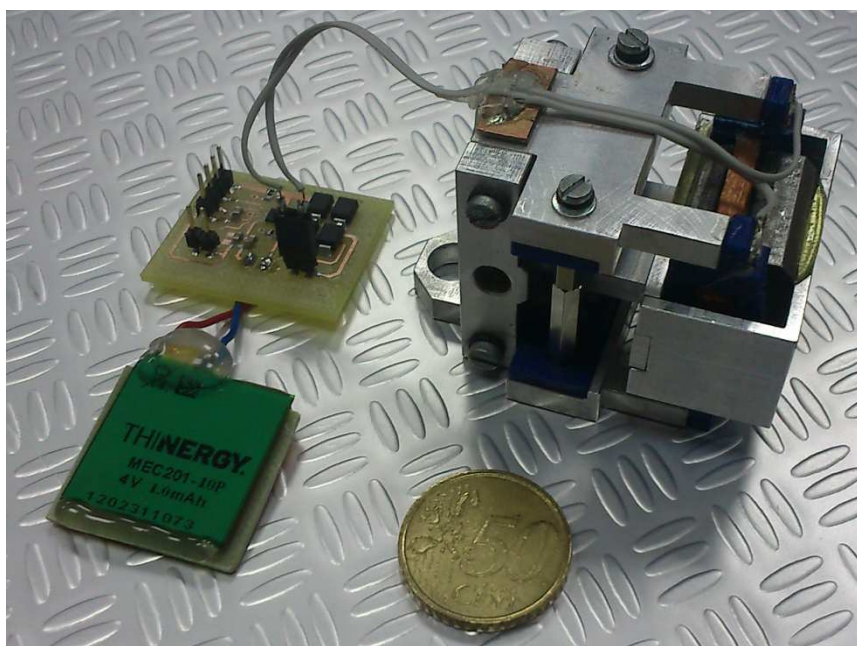
Obr. 16: schéma uložení pohyblivé části generátoru v pouzdru [2]

Finální zařízení

Model již funkčního zařízení vytvořeného a popsaného v publikaci [2] je vidět na obr. 17. Důležitou součástí vibračního generátoru je i elektrický obvod, který bude vytvořenou energii zpracovávat. V publikaci [13] se osvědčil typ MAX17710 od společnosti Maxim Integrated, který je společně s prototypem a baterií typu thin film vidět na obr. 18.



Obr. 17: model finálního zařízení [2]



Obr. 18: konečné funkční zařízení vibračního generátoru [13]

4.5. Srovnání jednotlivých principů

Každý z výše uvedených generátorů má určité své výhody a nevýhody. Piezoelektrický generátor se hodí tam, kde je potřeba vysoké generované napětí. Elektrostatický je zase ideální pro použití v MEMS strukturách. Elektromagnetický generátor není příliš omezen rozměrově a má vysoký výkon. Magnetostrikční najde uplatnění u vibrací zhruba do 200Hz, které jsou pro elektromagnetický generátor už příliš vysoké, a tam kde jsou stále zapotřebí větší rozměry kvůli výkonu.

Typ generátoru	Vlastnosti
Piezoelektrický	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodný jako zdroj energie pro frekvence vibrací větší než 100Hz až několik kHz. + Vysoké generované napětí. - Vysoký vnitřní odpor, malý proud.
Elektrostatický	<ul style="list-style-type: none"> + Velký potenciál pro integraci do MEMS struktur (frekvence vibrací až několik kHz). - Vyžaduje samostatný zdroj napětí pro inicializaci přeměny energie. - Nízký výkon. - Použití mechanického dorazu.
Magnetostrikční	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodný jako zdroj energie pro frekvence přibližně do 200Hz - Nízký výkon.
Elektromagnetický	<ul style="list-style-type: none"> + Vhodný jako zdroj energie pro frekvence vibrací do 50 až 100Hz. + Dostatečné generované napětí a výkon při rozměrově neomezeném generátoru. - Obecně nízké napětí.

Tab. 1: porovnání generátorů využívajících různé principy [2]

5. Vyhodnocení řešení problému

Cílem je návrh generátoru tak, aby se při spolupráci s průmyslovými partnery urychlila a zjednodušila jeho implementace do nových bezdrátových zařízení. Jedná se o komplexní simulační model generátoru. To znamená, že zahrnuje mechanický, magnetický a elektrický model včetně elektromechanické přeměny. Model byl parametrizován, aby ho bylo možné jednoduše upravit pro nové požadavky, které v budoucnu přijdou.

Generátor bude ze začátku využíván především pro letecké aplikace. V těchto strojích se frekvence vibrací pohybuje mezi 15 až 40Hz. Bude součástí senzorové bezdrátové sítě a bude zajišťovat dostatečné množství energie, aby jednotlivé systémy tvořené senzory, vysílačem a generátorem, byly autonomní.

V úvodní části práce bylo rozebráno několik inovativních řešení v oblasti vibračních energy harvesting zařízení. Současný vývoj a největší pokroky jsou ale v rozšiřování pásma vibrací, které dokáže generátor využít a v generování vibrací v nízkofrekvenčním prostředí. U motorových zařízení se frekvence příliš nemění a obvykle jsou zde některé frekvence výraznější. Na ně poté lze generátor jednoduše naladit. Použití složitějších širokopásmových generátorů by v současné době zatím nemělo příliš smysl.

Podle vstupních požadavků se jeví jako nejvhodnější možnost využít generátor fungující na elektromagnetickém principu. Toto zařízení je potřeba navrhnout tak, aby kromě co nejvyššího výkonu a účinnosti byla zajištěna co nejjednodušší konstrukce, co nejmenší množství pohybujících se částí a co největší životnost. Kritériem je také hmotnost generátoru, která by měla být co nejmenší při zachování požadovaného výkonu. Jako vhodný se jeví generátor vyvinutý na Vysokém učení technickém v Brně, který je detailně popsán v publikaci [2]. Byl konstruován pro prostředí s vibracemi o frekvenci přibližně 34Hz. Očekávaný výkon byl okolo 5mW. Hodnoty jsou dostatečně podobné na to, aby mohl tento generátor sloužit jako výchozí.

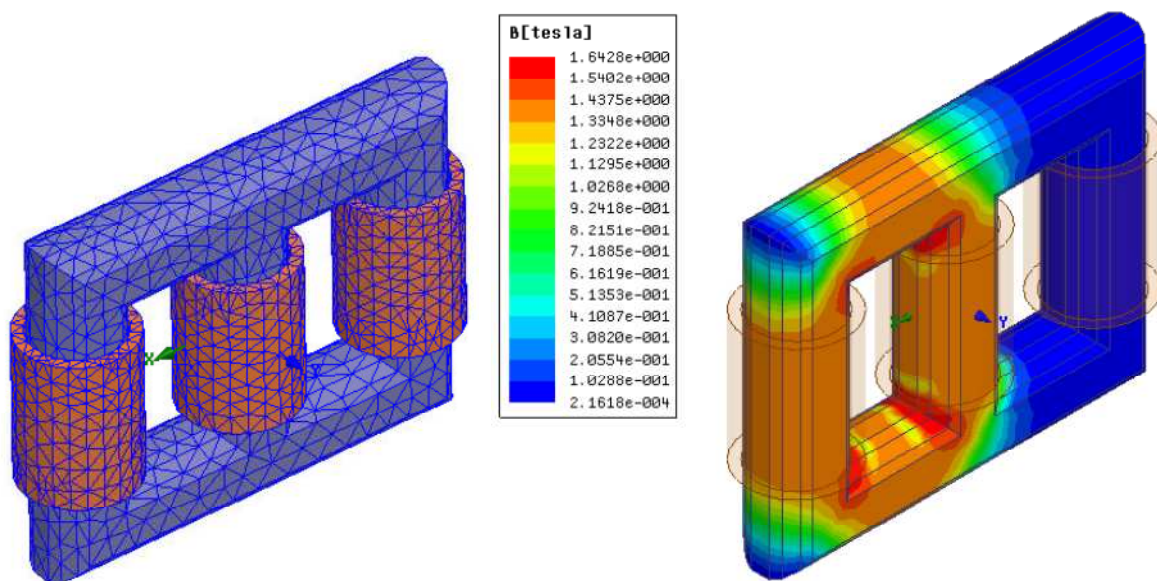
Praktická část této práce vychází ze spolupráce s další diplomovou prací [12], která se zabývá analýzou výkonových požadavků a poté návrhem rozměrů, konstrukcí a návrhem elektroniky vibračního generátoru.

6. Software Ansys Maxwell

Cílem práce je vytvořit komplexní simulační model generátoru. To znamená, že bude zahrnovat mechanický, magnetický a elektrický model včetně elektromechanické přeměny. Pro tuto aplikaci se jako nejvhodnější možnost jeví využít software společnosti Ansoft. Konkrétně Ansys Maxwell.

Jedná se o matematický software, který pro výpočty a simulace magnetických polí využívá metodu konečných prvků (MKP). Využívá se při návrhu a analýze cívek, transformátorů, elektromotorů, generátorů a dalších.

Ansys Maxwell zvládne importovat stavové modely a geometrie z dalších programů, využívajících pro simulace metody konečných prvků. Dokáže spolupracovat s několika specializovanými programy jako je Simplorer, Workbench, PExprt, nebo Rmxprt. To je velmi důležitá vlastnost, která významně rozšiřuje simulační možnosti. Díky tomu je možné dynamicky simulovat chování celé soustavy vibračního generátoru včetně připojených obvodů a zátěže.



Obr. 19: ukázka výpočtu a znázornění velikosti magnetické indukce na transformátoru s jedním primárním a dvěma sekundárními vinutími [14]

7. Vibrační generátor v programu Maxwell

7.1. Sestavení modelu

Model je navržen parametricky. Je tedy důležité definovat, jak se budou zadávat vstupní parametry generátoru. Geometrii lze importovat dvěma způsoby:

- Načtením celého modelu velice jednoduše z jiného programu pracujícího s metodou konečných prvků jako je AutoCAD, Catia, SolidWorks a další. Nevýhodou je, že by se muselo pokaždé nastavovat velké množství vlastností. Například: směry magnetického toku, definice materiálů a elektricky aktivních prvků, vytvoření pomocných geometrií důležitých pro analýzu a především znovu nastavovat analýzu samotnou.
- Druhou možností je pracovat pouze s proměnnými. Tyto proměnné získají své hodnoty ze vstupního vektoru, který obsahuje všechny potřebné rozměry pro konstrukci celého generátoru. To je mnohem složitější, ale pouze při prvním sestavování. Pro testování nových geometrií se již celý model automaticky nastaví včetně analýzy, a to pouze na základě vstupního vektoru.

Vzhledem k požadavkům a cílům této práce je zřejmé, že vhodnější bude využít druhou možnost implementace geometrie.

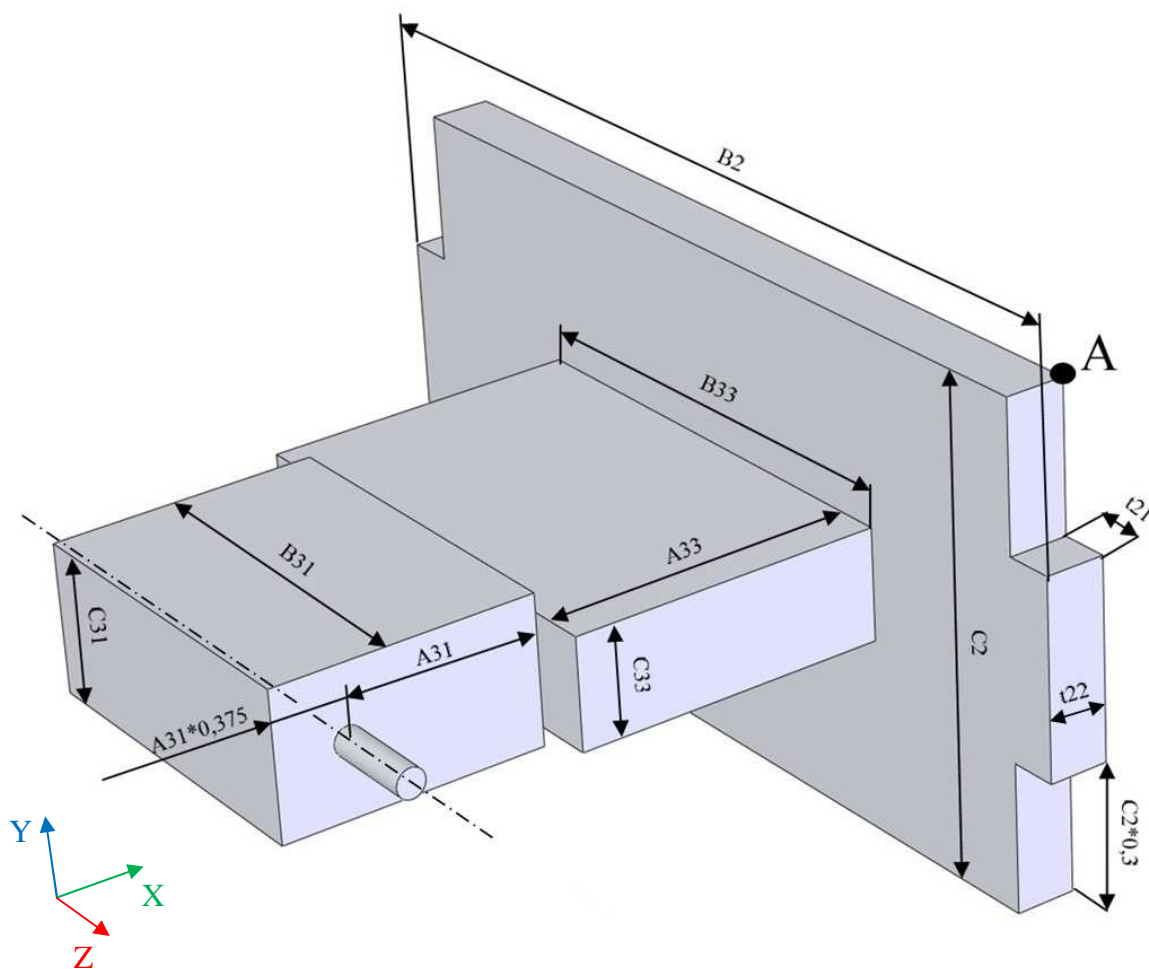
7.1.1. Model geometrie

Rozměry modelu vychází ze vstupního vektoru, který je tvořen 49 hodnotami. Ty byly získány ze spolupracující diplomové práce [12]. Postup vygenerování tohoto vektoru je zmíněn v kapitole 8.2. Vektor se zadává přímo do proměnných projektu. Zde jsou také definovány jednotlivé rozměry, které si z vektoru vezmou aktuální hodnotu. Od nich se potom odvíjí další výpočty.

Definice části vstupního vektoru je vidět v tab. 2 a jeho proměnné jsou na obr. 20 přiřazeny k příslušným kótám.

Část generátoru	Pozice ve vektoru	Proměnná	Část generátoru	Pozice ve vektoru	Proměnná
TYČ	0	dt	RAMENO	11	B2
	1	delkaTyce		12	T22
RAMENO	2	C31	KLEC	13	A2
	3	A31		14	B2
	4	B31		15	T21
	5	C33		16	C2
	6	B32		17	T22
	7	A33	DRŽÁK 1	19	B41
	8	PrumerTycky		20	A41
	9	C2		21	B51
	10	T21	

Tab. 2: definice několika prvních pozic ve vstupním vektoru



Obr. 20: parametricky zakótovaná část vibračního generátoru

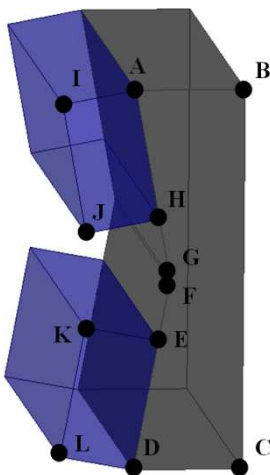
Maxwell neumožňuje vytváření vazeb mezi jednotlivými geometriemi. Všechny prvky tedy musely být zakótovány vzhledem k nulovému bodu ležícímu na ose rotace uprostřed tyče. Výsledek je takový, že počátek tělesa, vycházejícího z bodu A (viz obr. 20) musí být zadán následovně:

$$A_x = A_{31} + A_{33} + t_{22} \quad (1)$$

$$A_y = \frac{C_2}{2} \quad (2)$$

$$A_z = \frac{B_2}{2} - t_{21} \quad (3)$$

Zbytek tělesa byl poté zadán pouze jeho rozměry. Tuto metodu lze uplatnit pouze u jednoduchých těles, jejichž jednotlivé hrany jsou rovnoběžné s osami. U složitějších tvarů nebo i kvádrovitých, ale pootočených částí, jako např. na obr. 21, musela již být zadána poloha všech bodů průřezu vzhledem k počátku. Pro tuto část generátoru, skládající se ze dvou permanentních magnetů a pólového nástavce, musela být definována absolutní poloha 12 bodů. Spojením těchto bodů a následným vytažením geometrie podél určité osy vznikla daná součást.

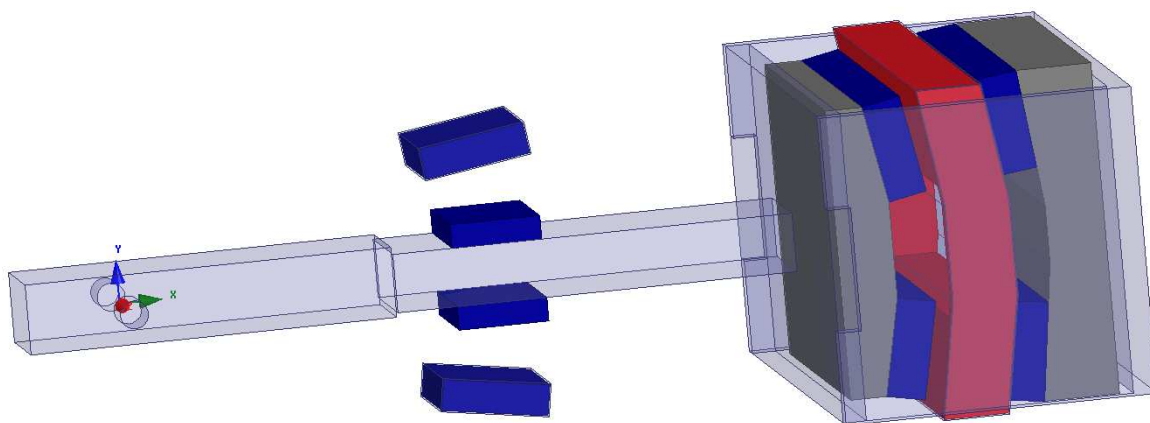


Obr. 21: zvýraznění bodů, jejichž poloha musela být zadána vzhledem k počátku

Takto složitě vytváření modelu je v dnešní době poněkud neobvyklé. Většina jiných programů je v tomto ohledu mnohem propracovanější a umožňuje nejen tělesa libovolně natáčet, ale také vytvářet jejich vzájemné vazby a jednoduše generovat i daleko složitější nepravidelné tvary. Z hlediska námi požadovaných analytických schopností se ale jedná o unikátní software a to je důležitější.

7.1.2. Nastavení materiálů

Jakmile byl sestaven celý model, přišlo na řadu definování jednotlivých materiálů. Pro pólové nástavce byla vybrána ocel 1008. Na obr. 22 jsou vyznačeny šedou barvou. Červeně je poté zbarvena cívka, která je z mědi. Další částí je průhledná hliníková kostra. Materiál lze vybrat z široké nabídky a případně ho dodatečně upravit pro upřesnění vlastností. Největší pozornost bylo potřeba věnovat nastavení magnetů.



Obr. 22: kompletní mechanický model

Nastavení magnetů

Jako nejvhodnější byly vybrány neodymové magnety, které jsou v současnosti nejsilnější na trhu. Obecnou nevýhodou je relativně nízká teplotní odolnost (do 200°C), která ale bude pro předpokládanou aplikaci dostačovat. Magnetické vlastnosti jsou dány Remanencí a Koercivitou. Tyto údaje pocházejí z aktuální tržní nabídky dostupné ze zdroje [22]. Po několika testech při optimalizaci rozměrů magnetů (podrobnosti jsou v následující kapitole) a uvážení dalších vhodných vlastností byl nakonec vybrán typ, jehož parametry jsou shrnuty v tab. 3.

typ	VMM3UH
teplotní odolnost	do 180 °C
Remanence (Br)	1080 – 1150 mT
Koercivita (Hc)	796 – 860 kA/m
max. energetický součin (měřítko síly)	28 – 31

Tab. 3: vlastnosti použitých magnetů [22]

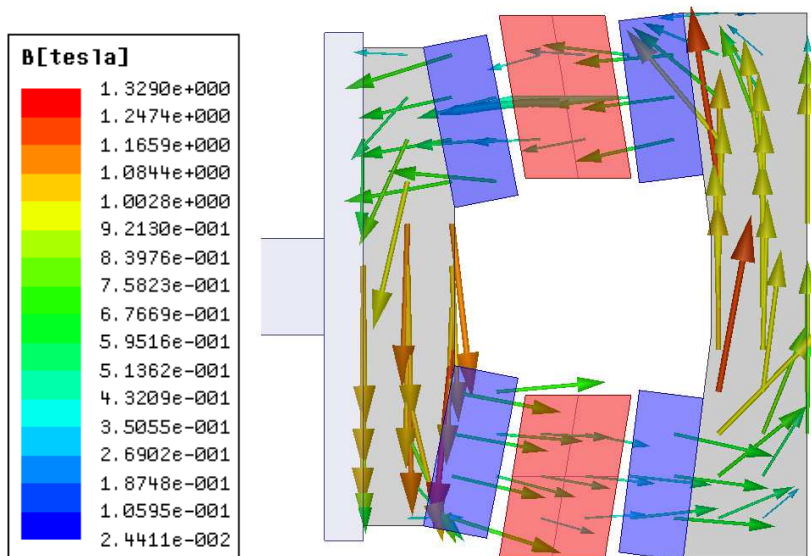
Remanence a koercivita se v modelu upravují v proměnných projektu a lze je nastavit zvlášť pro magnety v okolí cívky, zvlášť pro tuhostní magnety připevněné na pohyblivém rameni a zvlášť pro magnety uchycené na základním tělese.

Dále bylo potřeba správně nastavit směr magnetizace. Pro každý magnet se musel speciálně vytvořit nový materiál a u každého z nich nastavit požadovaný směr toku siločar. To bylo provedeno pomocí směrového vektoru, opět parametricky.

7.2. Magnetostatiké simulace

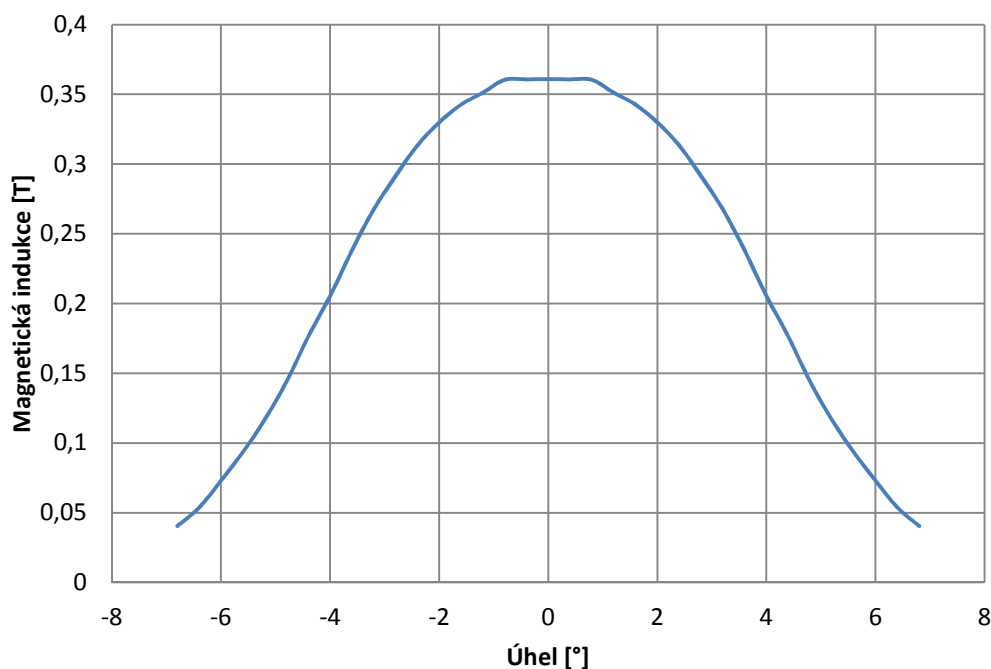
Magnetostatika umožňuje analyzovat nepohybující se modely. Určitou náhradou pohybu je parametrická simulace, kde se nastavuje změna určitých proměnných v požadovaném kroku. Pokud je například požadavkem simulování rotace, vytvoří se proměnná, k níž se vztáhne natočení pohyblivých částí modelu. Tato proměnná se jako parametr bude s každým krokem měnit o určitou velikost a v každém kroku se poté řeší magnetostatická úloha.

Na obr. 23 je vidět simulace magnetické indukce při nulovém natočení. Tímto se ověřilo, že byly správně nastaveny směry magnetizace u jednotlivých magnetů.



Obr. 23: průběh indukčních čar v budicím obvodu

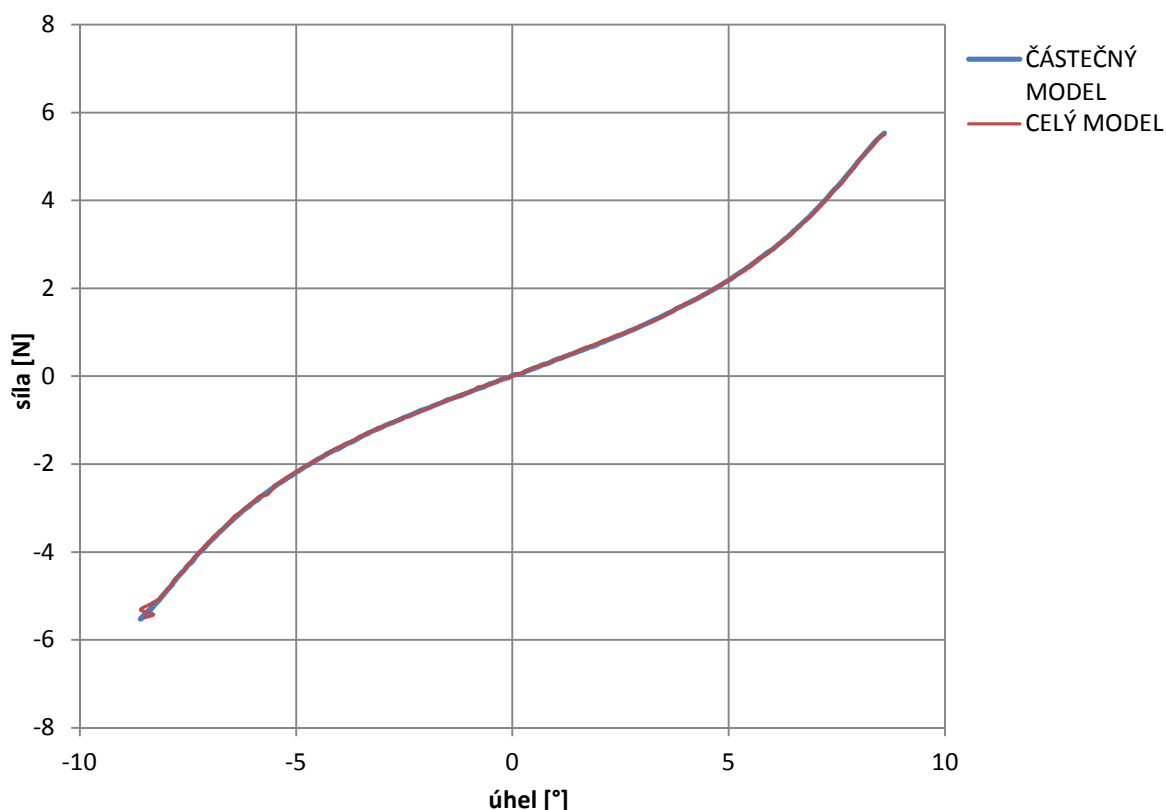
Dále se nastavilo měření magnetické indukce na ploše cívky v rámci celé parametrické simulace, kdy rameno měnilo polohu z $-6,8^\circ$ do $+6,8^\circ$ s krokem $0,4^\circ$. Na obr. 24 je patrné, že magnetická indukce je nejvyšší při nulovém natočení a to právě z toho důvodu, že cívka leží přímo mezi magnety. S rostoucím natočením se snižuje plocha cívky, kterou procházejí siločáry, a indukce tedy klesá.



Obr. 24: průběh magnetické indukce na ploše cívky v závislosti na natočení ramene

7.2.1. Optimalizace velikosti tuhostních magnetů

Dalším krokem bylo nastavení rozměrů „tuhostních“ magnetů tak, aby se dosáhlo požadované tuhosti soustavy. Z důvodu náročnosti této operace je vhodné, aby byl model co nejjednodušší, ale zároveň si zachoval všechny významné charakteristiky. Vzhledem k symetričnosti modelu bylo možné využít 2D model. Při optimalizaci tuhostních magnetů by potenciálně neměl hrát významnou roli ani budicí obvod. Muselo se ale ověřit, jak velký vliv má na tuhostní charakteristiku. Vznikly tedy dva modely. První se skládal pouze z ramene a čtyř magnetů. U druhého modelu byl přidán i budicí obvod. Následně se spočítala síla, kterou na sebe působí oba páry magnetů. Vždy se brala v úvahu pouze ta složka síly, která je kolmá k ramenu, ať už bylo natočené jakkoliv. Tato složka má totiž hlavní vliv na pohyblivost soustavy. Vektorovým součtem těchto dvou sil byla získána tuhostní charakteristika. V grafu na obr. 25 je znázorněna tuhostní charakteristika pro celý model i pro částečný model bez budicího obvodu.

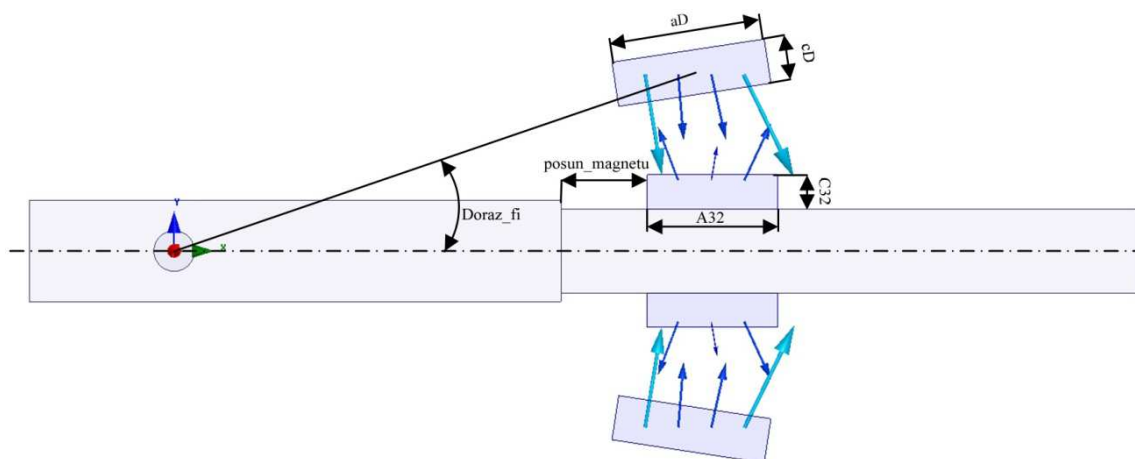


Obr. 25: tuhostní charakteristika pro celý model a pro částečný model bez budicího obvodu

Z obrázku je patrné, že jsou průběhy téměř totožné. Pro matematické vyjádření rozdílnosti se využila směrodatná odchylka, která vychází ze vzorce:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Kde N je množství vypočítaných hodnot. V našem případě se jedná o porovnání dvou grafů, N je tedy 2. x_i vyjadřuje vypočtené hodnoty a \bar{x} jejich průměr. Tato směrodatná odchylka se spočítala pro všechny body grafu. Celkem jich bylo 173. Maximální směrodatná odchylka měla hodnotu 0,107 a průměr se pohyboval okolo 0,001. Tyto hodnoty jsou velmi nízké. Můžeme tedy bez problémů zjednodušit optimalizační model jen na soustavu tuhostních magnetů (viz obr. 26).



Obr. 26: zjednodušená soustava s vyznačenými proměnnými pro optimalizaci

Na obr. 26 jsou vyznačeny proměnné, jejichž velikosti se budou optimalizovat. Těchto 6 hodnot bylo potřeba zvlášť definovat a ve vlastnostech optimalizace vhodně zvolit počáteční odhad a rozsah, v kterém se mohou hodnoty pohybovat. Vstupním požadavkem jsou vždy dvě hodnoty silového působení pro dva úhly natočení. Například pro úhel $3,5^\circ$ je požadována síla $1,4\text{N}$ a pro úhel 7° síla o velikosti 10N . Jedná se o sílu, která v jakémkoliv úhlu natočení působí kolmo na rameno. Při optimalizaci bylo také důležité vhodně zvolit počet iterací. Vzhledem k výrazné nelinearitě systému se nedařilo zajistit konvergenci iterací, ale při větším množství iteračních kroků bylo nalezeno několik vhodných kombinací pro zajištění požadovaných vlastností s dostatečnou přesností.

Po úspěšném nalezení vhodných parametrů „tuhostních“ magnetů je potřeba u těchto šesti proměnných zkopírovat jejich aktuální hodnotu do komplexního 3D modelu. Maxwell totiž neumožňuje jakýkoliv import, export, nebo sdílení proměnných.

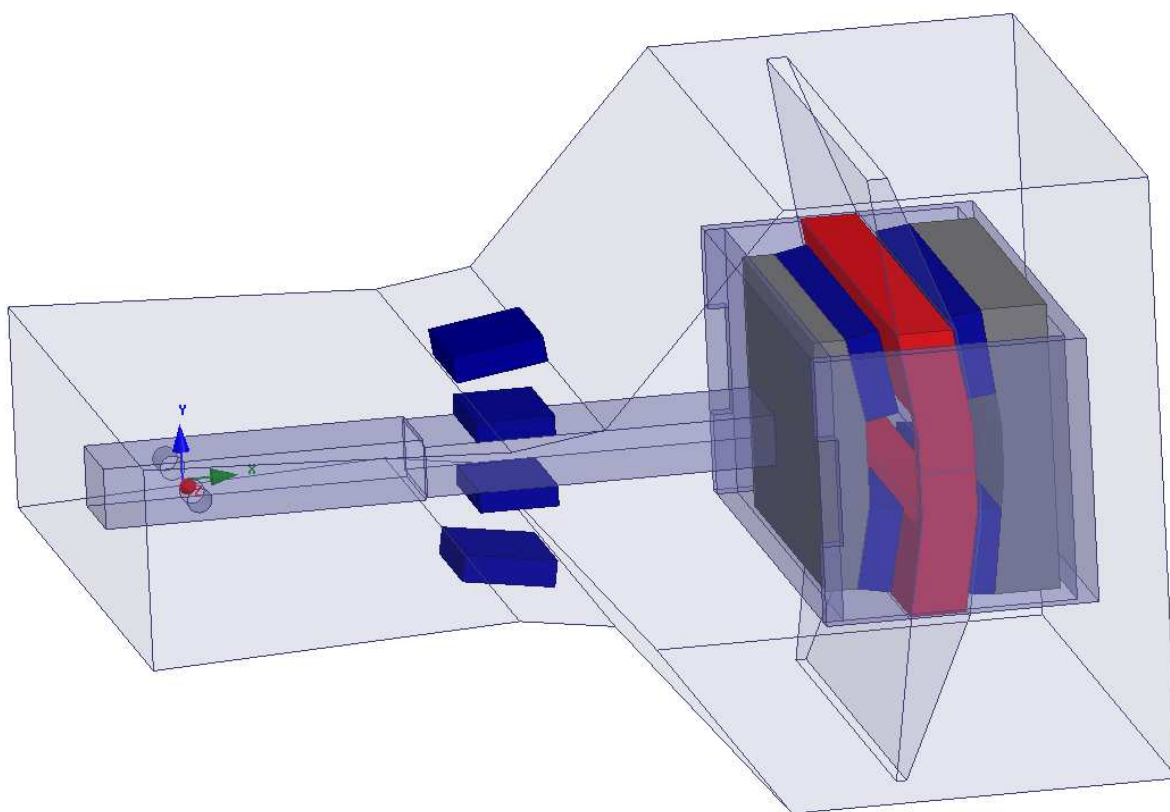
7.3. Transientní simulace

Tento typ řešení je přímo určen k simulaci pohybujících se zařízení a nabízí více možností analýzy. Je potřeba připravit model přímo pro tuto analýzu.

7.3.1. Určení pohyblivých částí

Jako první je důležité nastavit, které prvky budou pohyblivé a které nikoliv. To se provádí ohraničením pohyblivých částí pomocí tělesa, které musí splnit několik podmínek:

- Musí být dostatečně veliké, aby nedošlo k situaci, kdy by se v některé maximální poloze dostalo rameno generátoru do kolize s hranou tělesa.
- Musí se jednat o jeden kus.
- Všechny nepohyblivé části musí být vně tohoto tělesa a musí zde být alespoň minimální mezera, aby se nedotýkaly.
- Těleso v sobě nesmí mít dutiny.

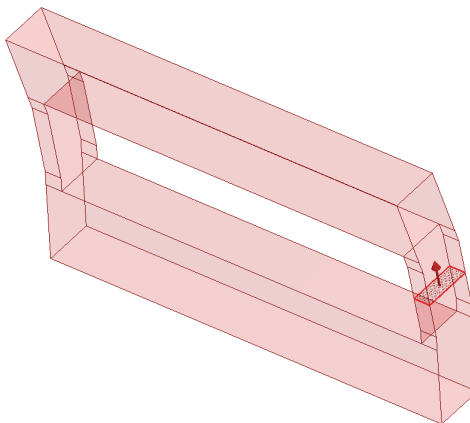


Obr. 27: ohraničení pohybových možností ramene generátoru

Jakmile je toto těleso vytvořeno, určí se, jak se v něm budou ostatní tělesa pohybovat. V tomto případě se jedná o rotaci okolo osy Z a s nastavenou maximální výchylkou 7° v obou směrech.

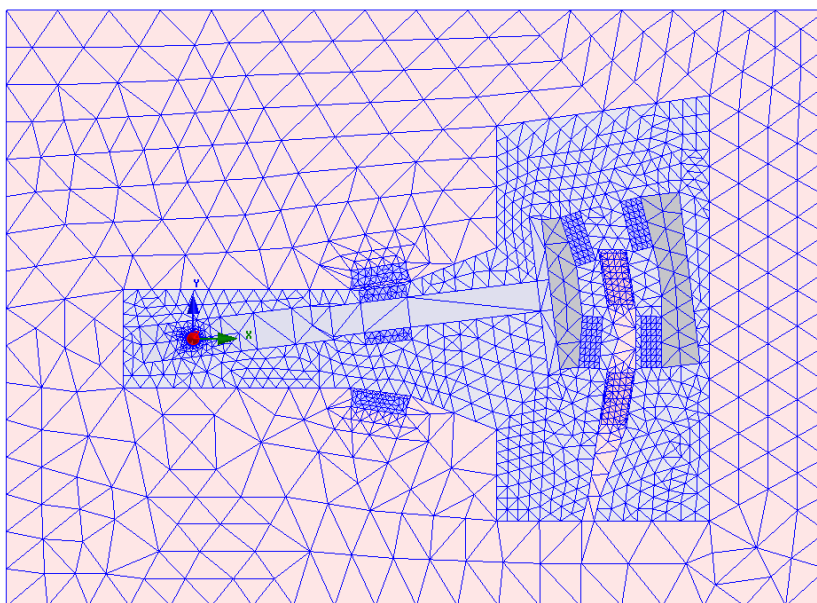
7.3.2. Nastavení cívky a meshování

Pro transientní analýzu bylo dále potřeba doplnit vlastnosti cívky. K tomu slouží tzv. *coil terminal*, kde se určuje průřez cívky, vinutí, počet vodičů a počáteční stav. Cívka má 650 závitů.



Obr. 28: Cívka se zvýrazněným průřezem, kde se jedná o tzv. *coil terminal*

Dalším krokem je meshování, neboli určení jemnosti sítě konečných prvků. Je velmi důležité se na toto nastavení zaměřit. Pokud bude zvolena příliš jemná síť, výsledky budou přesné, ale výpočet bude trvat velice dlouho. Při opačném extrému, kdy jsou rozměry prvků veliké, hrozí, že se model nebude chovat reálně, nebo nebude fungovat vůbec. Jemnost může být pro každý prvek jiná. Části, které jsou důležité pro přesný výpočet, mají síť jemnější, než části které výsledek neovlivní.



Obr. 29: Meshování – jemnost sítě u 2D modelu

7.3.3. Mechanický model

Maxwell sám o sobě nedokáže simulovat dynamický pohyb. Pro tento účel se využilo možnosti propojit Ansys Maxwell s programem Ansys Simplorer, který umožňuje modelování, simulaci a analýzu dynamických modelů. Vše probíhá v grafickém rozhraní formou blokových schémat. Dynamické rovnice vycházející z Langrangeových rovnic 2. druhu byly získány v publikaci [19]:

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q} + \frac{\partial E_p}{\partial q} + \frac{\partial E_b}{\partial \dot{q}} = Q \quad (5)$$

Kde E_k je kinetická energie, E_p potenciální energie, E_b disipativní energie, Q vnější působení a q je souřadnice. Jednotlivé energie se poté spočítají z následujících rovnic:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{q}(t)^2 \quad (6)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot k \cdot q(t)^2 \quad (7)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot b \cdot \dot{q}(t)^2 \quad (8)$$

Proměnná m značí zobecněnou hmotnost generátoru, k je zobecněná tuhost a b zobecněné tlumení. Spojením těchto rovnic se získá celková rovnice popisující dynamické chování generátoru:

$$I \cdot \ddot{\varphi}(t) + (b_{mech} + b_{el}) \cdot \dot{\varphi}(t) + k \cdot \varphi = a_{in} \cdot I \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{i} \quad (9)$$

I značí moment setrvačnosti. Tato hodnota byla automaticky vypočítána po zkonstruování modelu v programu SolidWorks. Dále φ je aktuální úhel ramene, $\dot{\varphi}$ jeho rychlost a $\ddot{\varphi}$ zrychlení. Dále a_{in} je zrychlení vibrací, ω frekvence vibrací a i poloměr setrvačnosti, což je vzdálenost od osy rotace ramene k jeho těžišti.

Pro sestavení už stačí pouze určit b_{mech} a b_{el} :

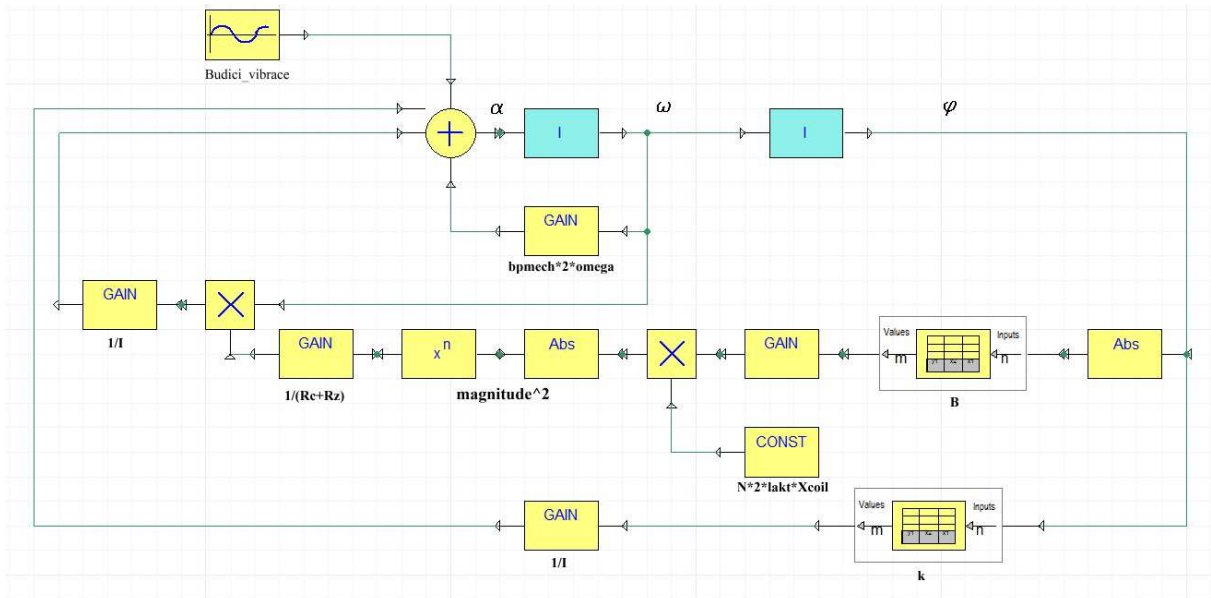
$$b_{mech} = 2 \cdot \zeta_{mech} \cdot m \cdot \Omega \quad (10)$$

$$b_{el} = \frac{(B \cdot 2 \cdot l_{aktiv} \cdot N \cdot x_{coil})^2}{R_z + R_c} \quad (11)$$

Kde ζ_{mech} je poměrné tlumení, Ω je rezonanční frekvence, B je indukčnost a l_{aktiv} je aktivní délka cívky, což odpovídá dvojnásobku hloubky magnetů. Dále N je počet závitů R_z a R_c jsou odpory zátěže a cívky a x_{coil} značí vzdálenost od osy rotace do středu cívky. Na závěr se rovnice (9) upraví a doplní do tvaru, podle kterého se model sestavoval:

$$\ddot{\varphi}(t) = a_{in} \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\sqrt{\frac{I}{m}}} - \left(\frac{2 \cdot \zeta_{mech} \cdot m \cdot \Omega}{I} - \frac{I \cdot (B \cdot 2 \cdot l_{aktiv} \cdot N \cdot x_{coil})^2}{R_z + R_c} \right) \cdot \dot{\varphi} - \frac{k}{I} \varphi \quad (12)$$

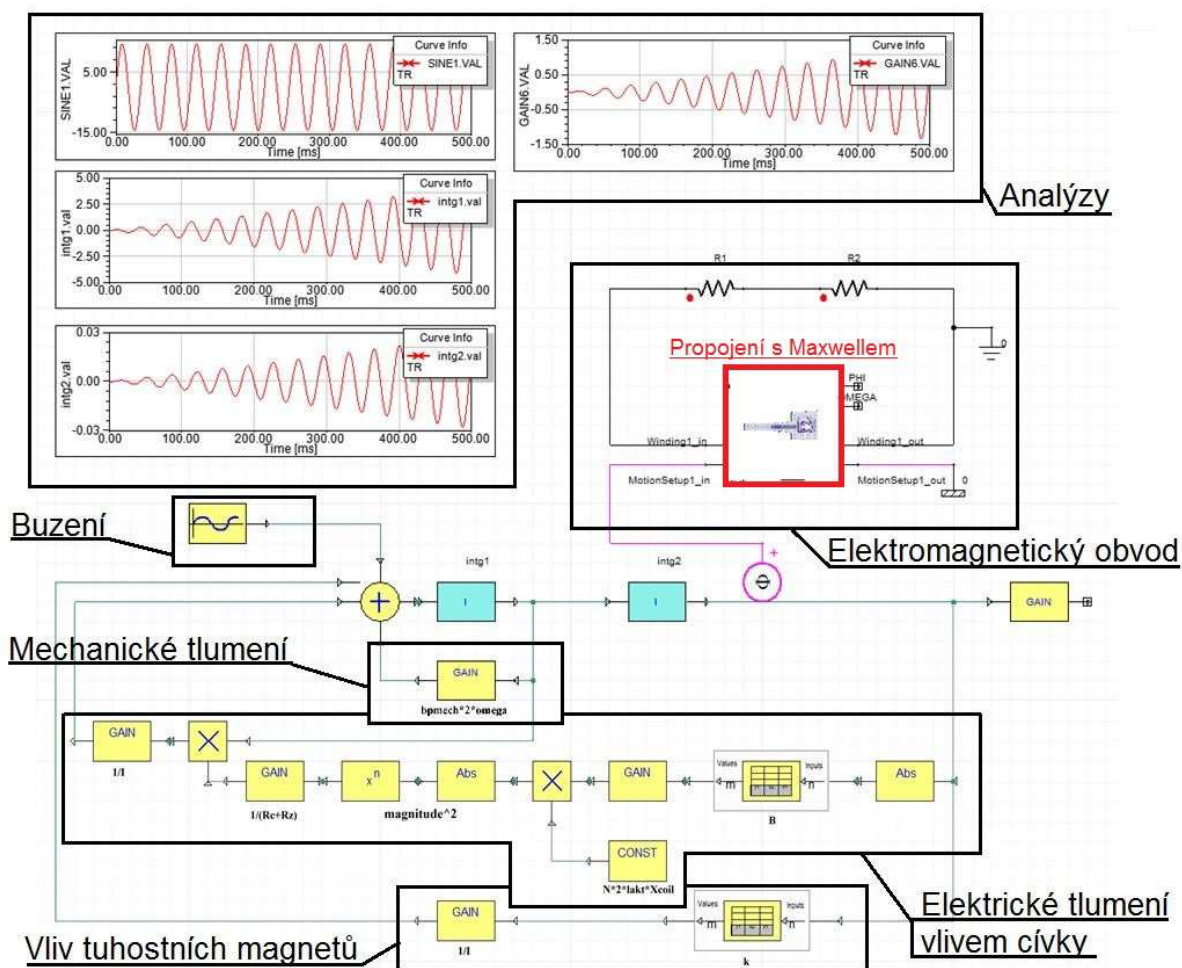
Magnetická indukce (B) a tuhost (k) jsou v modelu zakomponovány s využitím bloků *Lookup table*. Jedná se o tabulku dat, která vstupním hodnotám přiřazuje určité výstupní hodnoty. Pro vstupní data ležící mezi dvěma definovanými tabulkovými hodnotami se využije interpolace. *Lookup table* pro magnetickou indukci a pro tuhost vychází ze simulací, které byly provedeny při magnetostatické analýze (viz. obr. 24 a obr. 25).



Obr. 30: matematický model dynamického chování mechanické části

7.3.4. Komplexní model pro transientní analýzu

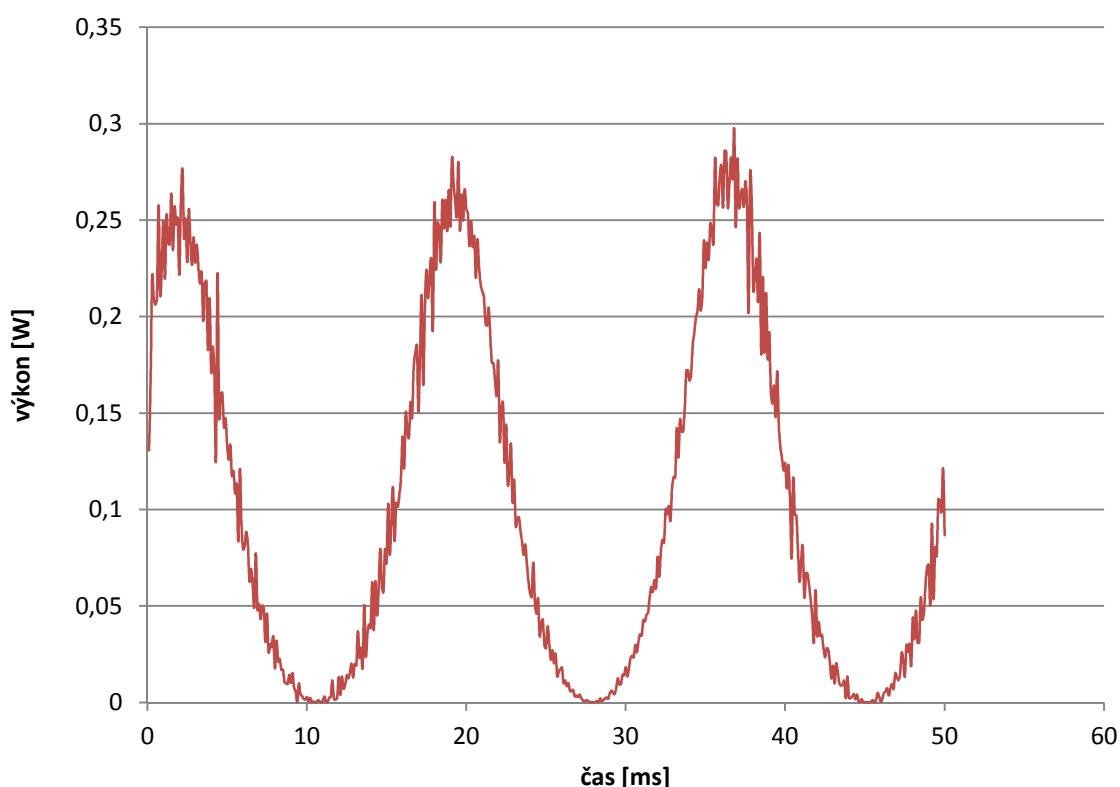
Posledním krokem bylo propojení modelů v obou programech. V Maxwellu se musí nastavit externí připojení cívky a externí ovládání pohybu. Zbytek se poté řeší v programu Simplorer, kde se model generátoru z Maxwellu vloží jako blok. K němu se poté připojí elektrický obvod se zátěží. Simplorer také umožňuje zobrazení průběhu různých veličin přímo na hlavní ploše. Po skončení simulace je tedy okamžitě vidět vše důležité.



Obr. 31: komplexní model pro analýzu chování vibračního generátoru

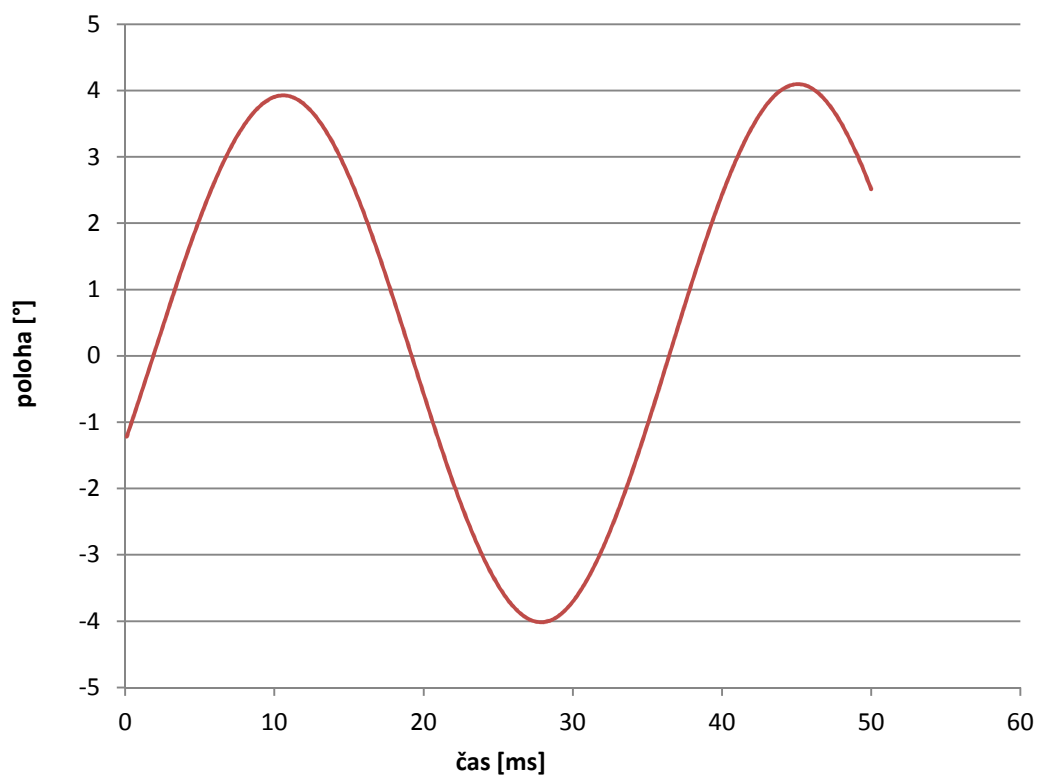
7.4. Výsledky simulačního modelu

Skutečné kmitání generátoru získané z dynamického modelu bylo v první fázi nahrazeno sinusovým průběhem o stejné amplitudě a frekvenci. Důvodem byl rychlejší průběh simulace, kterého se využilo pro testování chování generátoru. Generátor byl konstruován pro zátěžný odpor 1000Ω . Na obr. 32 je vidět průběh výkonu v závislosti na čase v ustáleném stavu. Jedná se o výsledky ze simulace s plnohodnotným dynamickým modelem. Přechodový děj mezi počátkem simulace a ustálením trvá přibližně 3 sekundy. Střední hodnota výkonu byla v této simulaci 102,1mW.

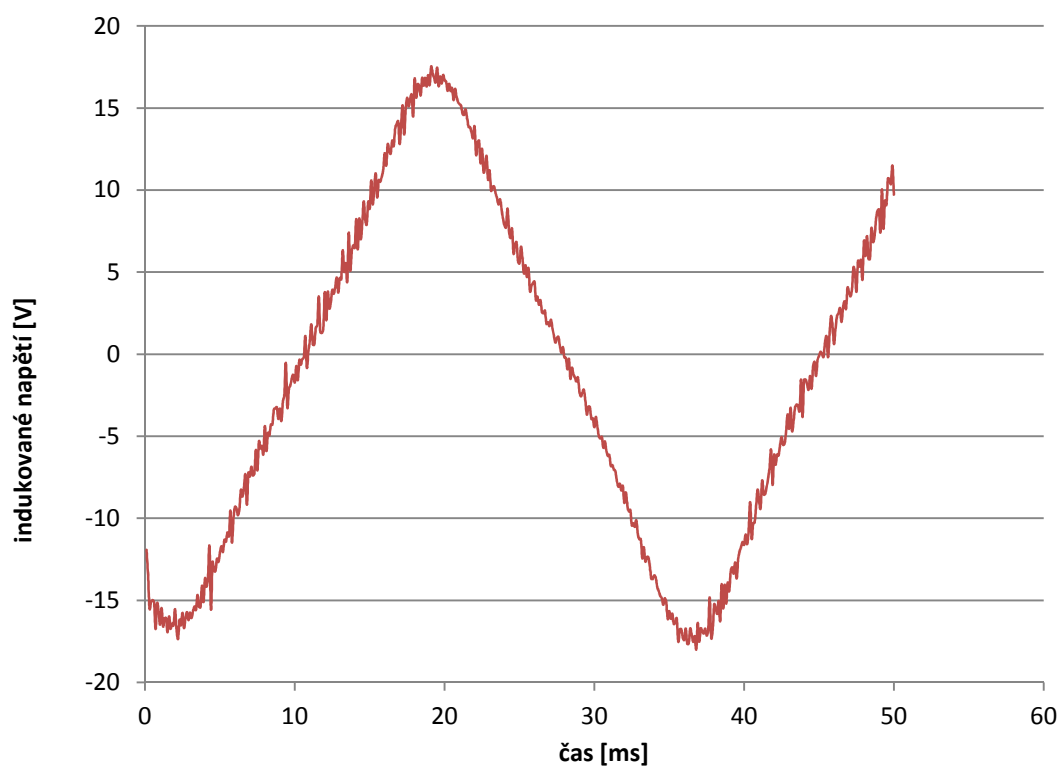


Obr. 32: průběh výkonu

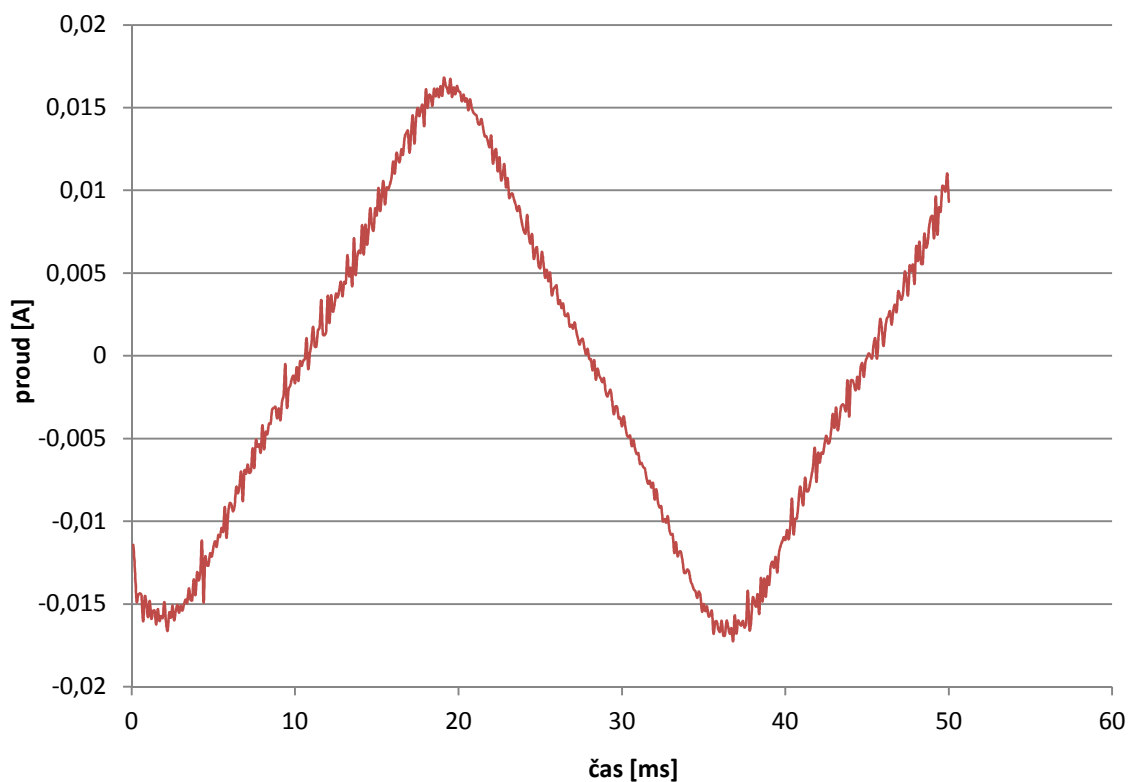
Kromě výkonu ovlivnila změna zátěžného odporu také amplitudu kmitání (obr. 33), indukované napětí na cívce (obr. 34) a proud na zátěži (obr. 35). Na obr. 36 je zobrazena intenzita magnetické indukce v průřezu generátoru pro natočení 4° .



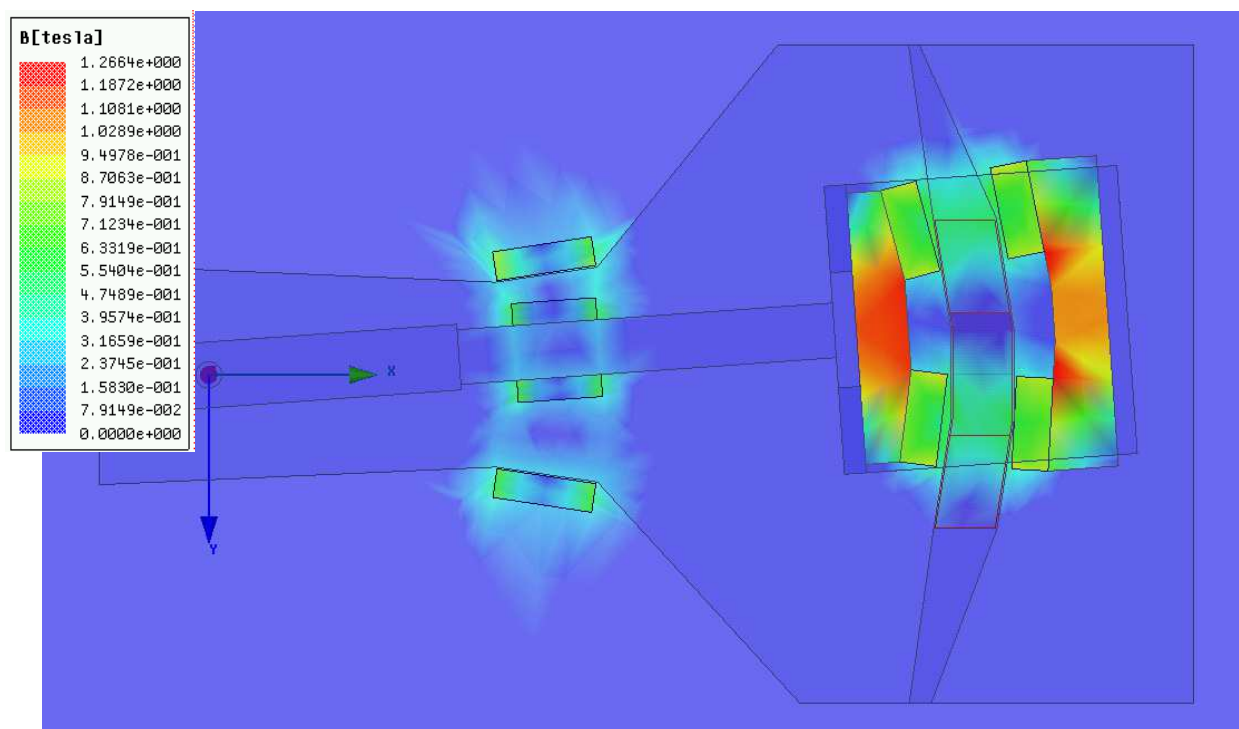
Obr. 33: průběh kmitání ramene



Obr. 34: průběh indukovaného napětí



Obr. 35: průběh proudu na zátěži



Obr. 36: znázornění intenzity magnetické indukce v řezu generátorem při natočení 4°

8. Postup návrhu generátoru pro budoucí aplikace

Ve spolupráci s diplomovou prací [12] vznikl kompletní postup návrhu generátoru s předpřipravenými nástroji a popsány jednotlivými kroky. V této kapitole jsou shrnuty a sjednoceny výsledky této, i diplomové práce [12]. Postup návrhu je aplikován na stejné vstupní požadavky, s kterými se pracovalo v předchozích kapitolách. Návod je ale dostatečně obecný na to, aby se z něj dalo vycházet pro jakékoliv jiné vstupní požadavky.

8.1. Vstupní data a požadavky

Nejprve je potřeba definovat požadované vlastnosti generátoru, které se odvíjí podle toho, v jakém prostředí bude pracovat a co bude napájet. Musí se tedy určit následující:

- Frekvence, amplituda a zrychlení vibrací, na které se bude generátor ladit. Tyto hodnoty lze získat přímo z měření v určitém místě na daném stroji, kde bude generátor pracovat. Pomocí Fourierovy transformace se poté zjistí dominantní frekvence a následovně i amplituda a zrychlení.
- Požadovaný výkon. Ten se odvíjí podle toho, co bude generátor napájet. Zdali půjde například o ukládání energie do baterie a občasné změření dat připojeným senzorem a jejich odeslání bezdrátovým vysílačem nebo se bude jednat o náročnější soustavu, která může obsahovat i mikroprocesor.
- Rozměry a hmotnost generátoru. Jedná se o důležitý parametr, který ale bývá často velice limitující. Výstupní výkon je výrazně závislý na velikosti generátoru. U leteckých aplikací, nebo u malých strojů je tedy zřejmé, že bude kladen důraz na maximalizaci výkonové hustoty.

V počátcích návrhu se využívá nahrazení skutečného průběhu vibrací za sinusoidu, která má vlastnosti blízké reálnému měření. Také samotný model se často zjednodušuje pro rychlé ověření, zda je možné dosáhnout požadovaných výsledků.

8.2. Návrh rozměrů generátoru

Pro získání nejlepších výsledků a maximální účinnosti je potřeba využít optimalizačních nástrojů. Ručním nastavováním rozměrů nelze získat kvalitní výsledky. Vytvoření takového nástroje bylo úkolem diplomové práce [12]. Vycházelo se z modelu, který byl sestrojen na VUT v Brně (viz. obr. 17 a obr. 18). Nejprve bylo potřeba určit vlastnosti materiálů, z kterých je model vyroben. Pro rameno byl zvolen hliník, pro pólové nástavce ocelové slitiny a magnety jsou z neodymu.

Dále se také určily parametry modelu a našly ty, které mají největší vliv na výstupní výkon, hmotnost a moment setrvačnosti. Bylo vybráno těchto 9 parametrů, kterým se určily rozsahy, v nichž se mohou jejich rozměry při optimalizaci pohybovat:

- a (1 – 10 mm) Vzdálenost mezi magnety budicího obvodu.
- b (1 – 5 mm) Šířka permanentních magnetů budicího obvodu.
- c (1 – 10 mm) Tloušťka pólových nástavců.
- f (5 – 20 mm) Délka permanentních magnetů budicího obvodu.
- angle5 (10° – 20°) Úhel zkosení pólových nástavců.
- N_{scu} (0,1 – 1) Poměr mezi plochou vodičů v průřezu cívky a celkovou plochou průřezu cívky.
- l_{akt} (5 – 20 mm) Délka části cívky, která leží přímo mezi magnety.
- l_{nos} (15 – 70 mm) Délka ramene od osy rotace k prvnímu pólovému nástavci.
- S_{cu} (0,1 – 2 mm) Průřez vodiče.

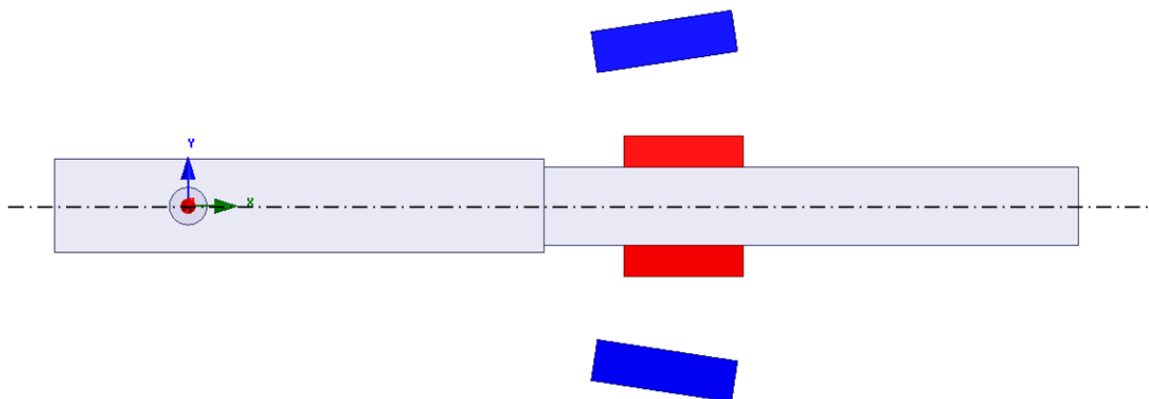
Ostatní parametry se poté dopočítají z těchto hlavních rozměrů. Optimalizační program je vytvořen v softwaru Matlab a vstupem je frekvence a zrychlení vibrací, požadovaný výkon, požadované výstupní napětí a maximální amplituda kmitání. V optimalizaci je též trvale zahrnut požadavek na minimální hmotnost a maximální životnost.

Jakmile proběhne optimalizace, vygeneruje se vektor obsahující 49 hodnot, kde jsou zahrnuty veškeré potřebné rozměry pro sestavení generátoru. Tento vektor se dále využije v programu Maxwell, kde se podle něj upraví rozměry předpřipraveného parametrického modelu. Dalším výstupem je požadovaná tuhost ve dvou natočeních. Na tuto tuhost se budou optimalizovat tuhostní magnety.

8.3. Nastavení tuhostních magnetů

Dalším krokem je nalezení vhodných rozměrů a polohy pro tuhostní magnety. Tento postup již byl popsán v kapitole 7.2.1. a zde bude zmíněn pouze okrajově. Optimalizace se provádí v programu Maxwell, kde jsou určeny rozměry magnetů (tloušťka, délka, vzájemný úhel a vzdálenost od osy rotace), které se budou upravovat tak, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků. Vstupním požadavkem do optimalizačního procesu jsou síly, které působí ve dvou konkrétních úhlech, přičemž první úhel je přibližně v polovině maximální výchylky a druhý úhel v blízkosti maximální výchylky.

Po skončení optimalizačního procesu je potřeba zhodnotit rozměry magnetů a najít komerčně prodáváný magnet s velikostí, která je nejbližší vypočítaným rozměrům. Pro přesnější výpočet tuhostní charakteristiky je vhodné po první optimalizaci do modelu zadat nalezené rozměry komerčně prodáváných magnetů pro jeden ze dvou symetrických párů (viz. červeně a modře znázorněné páry na obr. 37), zablokovat rozměry tohoto páru a nechat znova proběhnout optimalizaci. Poté se přizpůsobí rozměry pro komerční magnety i druhému páru a pomocí parametrické simulace se získá tuhostní charakteristika. Ta je důležitá pro dynamické modelování.



Obr. 37: zvýraznění symetrických dvojic magnetů

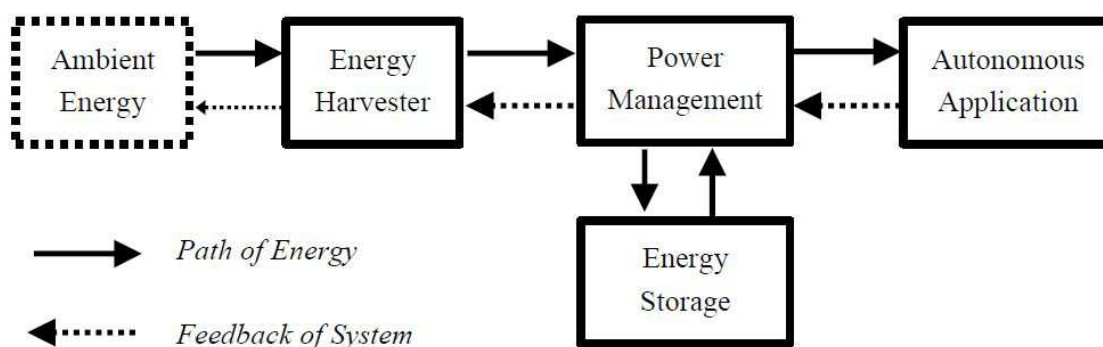
8.4. Power management

Při hledání vhodné elektroniky je důležité si uvědomit, že bude součástí autonomního systému a bude napájena přímo generátorem, který má malý výkon. Zásadní podmínkou je tedy co největší účinnost.

Výběr těchto komponent byl součástí diplomové práce [12] a zde jsou shrnuty výsledky. Zkoumalo se celkem 9 zařízení (LTC 3105, LTC 3534, LTC 3588-1, MAX17710, THINERGY MEC201, bg 25504 EVM, LTC 4071, CBC-EVAL-09 a CEB915 EnerChip). Z nich byly vybrány 3, které společně vytváří kompletní elektronický obvod včetně baterie:

- LTC 3588-1 (Slouží k usměrnění, konvertování indukovaného napětí a k úpravě výstupního napětí a proudu)
- MAX17710 (Systém pro ochranu a nabíjení baterií)
- THINERGY MEC201 (Mikro-baterie typu Thin film)

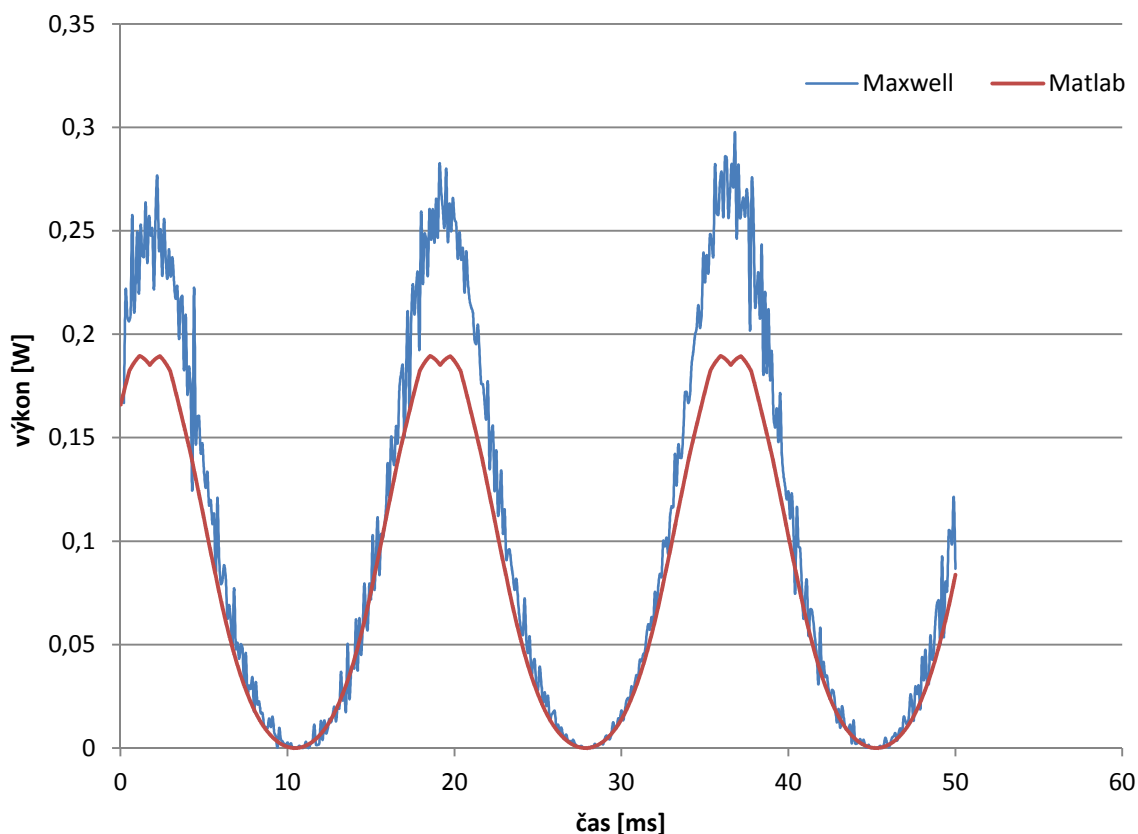
Tato soustava již byla reálně využita a je vidět na obr. 18. Schematické propojení těchto součástí je znázorněno na obr. 38.



Obr. 38: schéma propojení elektronických součástí [28]

8.5. Verifikace modelů

Ověření výsledků a přezkoumání splnění vstupních požadavků je součástí obou prací. V diplomové práci [12] je model testován v programu Matlab-Simulink ve formě blokových schémat znázorňujících matematické rovnice, které popisují chování celého systému a to jak dynamického, tak elektrického. V této práci je model testován pomocí dvou propojených programů, kde Ansys Simplorer zajišťuje dynamické chování modelu a Ansys Maxwell elektro-magnetické působení. Oproti Matlabu jsou modely vypočítávány metodou konečných prvků, což je mnohem náročnější. Pro průběžné testování modelu je tedy vhodné využít matematický model v prostředí Matlab-Simulink a závěrečné simulace provést v Maxwellovi a Simploreru. Na obr. 39 jsou k porovnání grafy průběhu výkonu z Maxwellovi se Simplorerem a z Matlabu. Rozdíly ve výsledcích jsou zapříčiněny faktem, že matematický model v Matlabu je oproti MKP modelu v Maxwellovi výrazně zjednodušen. Z toho důvodu jsou výsledky z Maxwellovi považovány za reálnější.



Obr. 39: vypočítaný průběh výkonu v Maxwellovi a Matlabu

9. Závěr

Výsledkem této práce bylo zpracování komplexního simulačního modelu vibračního generátoru. Pro nalezení vhodného principu elektromechanické přeměny energie a pro výběr vhodného typu generátoru bylo nejprve potřeba analyzovat současný vývoj v oblasti výzkumu energy harvesting systémů. Požadavkem na generátor byl výstupní výkon okolo 100mW, který bude generovaný z vibrací o frekvenci 15 – 45Hz. Vzhledem k tomuto zadání byl jako vhodný výchozí model vybrán generátor sestrojený na VUT v Brně. Tento generátor byl inovován, parametrizován a převeden do programu Ansys Maxwell, který umožňuje provádět elektromechanické simulace s využitím MKP.

Nejprve byl sestrojen jednoduchý 2D model, sloužící pro optimalizaci rozměrů tuhostních magnetů. Tím bylo dosaženo požadované tuhostní charakteristiky. Poté byl sestrojen komplexní model, který zahrnoval mechanický, elektromagnetický a elektrický model. Díky tomu bylo možné komplexně simulovat chování celého systému. Výsledky bylo možné porovnat s jinou simulací, která proběhla na matematickém modelu v prostředí Matlab-Simulink. Oba tyto modely mají určité výhody a nevýhody. Model v matlabu je velice rychlý na výpočet. Rychlost však byla zajištěna výrazným zjednodušováním. U Maxwellu je model komplikovanější a tím pádem jsou i výsledky daleko přesnější. Kvůli tomu ale výrazně roste časová náročnost těchto simulací. Výpočty většinou probíhají v řádu hodin, ale může to být i déle. Pro průběžné ověřování funkčnosti modelu je tedy vhodné zvolit Matlab a jakmile je model hotov, může se začít testovat v Maxwellu. Z něj se získají reálnější výsledky.

Celá takto navržená soustava modelů byla poté využita pro návrh generátoru, který měl pracovat na frekvenci 28Hz, zrychlení vibrací bylo stanoveno na 0,3G a požadovaný výstupní výkon na 100mW. Na základě předpřipravených parametrických modelů a optimalizací vznikl velmi rychle nový generátor. Při navrhování byl průběžně testován v Matlabu a na závěr bylo jeho chování simulováno v Maxwellu. Vypočítaná střední hodnota výkonu byla 102,1mW, což přesně odpovídá vstupním požadavkům. Pro maximální zkrácení simulace bylo potřeba zajistit, aby se při spuštění generátor nerozkládal z nulové polohy a byl co nejdříve v ustáleném stavu. To bylo zajištěno spuštěním pouze dynamické simulace, která proběhla rychle. Po ustálení byl vybrán jeden časový úsek. V něm mělo rameno generátoru určité natočení a určitou úhlovou rychlost. Tyto hodnoty byly poté vloženy do integrátorů jako počáteční podmínky. Tím se zajistilo, že bude generátor v ustáleném stavu již od počátku simulace.

Do budoucna bude podobných řešení přibývat a budou se dále zdokonalovat, což povede k výrazně rychlejší integraci energy harvesting zařízení. Ty se tak mohou v blízké budoucnosti stát součástí každodenního života.

10. Seznam použité literatury

- [1] S. Priya, D.J. Inman: Energy Harvesting Technologies. Springer US, 2009, 516 s., ISBN 978-0-387-76464-1
- [2] Z. Hadaš: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava, Disertační práce, FSI, VUT v Brně 2007, 97 s., Specialista doc. Ing. Vladislav Singule, CSc.
- [3] D. Samson, T. Otterpohl, M. Kluge, U. Schmid, Th. Becker: Aircraft-Specific Thermoelectric Generator Module [online]. 2009 [cit. 10.4.2013]. ISSN 03615235. Dostupné z doi: 10.1007/s11664-009-0997-7
- [4] A. Elefsiniotis, D. Samson, Th. Becker, U. Schmid: Investigation of the Performance of Thermoelectric Energy Harvester Under Real Flight Conditions [online]. 2012 [cit. 10.4.2013]. ISSN 03615235. Dostupné z doi: 10.1007/s11664-012-2411-0
- [5] S. Roundy, E. Takahashi: A Planar Electromagnetic Energy Harvesting Transducer Using a Multi-pole Magnetic Plate [online]. 2013 [cit. 10.4.2013]. ISSN 09244247. Dostupné z doi: 10.1016/j.sna.2013.03.018
- [6] Z. Chen, Y. Yang, Z. Lu, Y. Lou: Broadband Characteristics of Vibration Energy Harvesting Using One-dimensional Phononic Piezoelectric Cantilever Beams [online]. 2013 [cit. 10.4.2013]. ISSN 09214526. Dostupné z doi: 10.1016/j.physb.2012.10.029
- [7] K. Ashraf, M.H. Md Khir, J.O. Dennis, Z. Baharudin: Improved Energy Harvesting From Low Frequency Vibrations by Resonance Amplification at Multiple Frequencies [online]. 2013 [cit. 15.4.2013]. ISSN 09244247. Dostupné z doi: 10.1016/j.sna.2013.03.026
- [8] W.B. Hobbs, D.L. Hu: Tree-inspired Piezoelectric Energy Harvesting [online]. 2012 [cit. 15.4.2013]. ISSN 08899746. Dostupné z doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2011.08.005
- [9] Mizuno, M., Chetwynd, D.G.: Investigation of a resonance microgenerator, [online]. 2003 [cit. 18.4.2013]. ISSN 09601317. Dostupné z doi: 10.1088/0960-1317/13/2/307
- [10] H.R. Florentino, R.C.S. Freire, A.V.S. Sá, C. Florentino, D. Galayko: Electrostatic Vibration Energy Harvester with Piezoelectric Start-up Generator [online]. 2011 [cit. 18.4.2013]. ISSN 02714310. Dostupné z doi: 10.1109/ISCAS.2011.5937820
- [11] A. Lundgren, H. Tiberg, L. Kvarnsjö, A. Bergqvist: A Magnetostrictive Electric Generator [online]. 1993 [cit. 18.4.2013]. ISSN 0018-9464. Dostupné z doi: 10.1109/20.281119
- [12] M. Mařaš: Energy Harvesting Pro Letecké Aplikace, Diplomová práce, FSI, VUT v Brně 2013, 60 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

- [13] Z. Hadaš, V. Větiška, Z. Ančík, Č. Ondrůšek, V. Singule: Development of Energy Harvester System for Avionic, SPIE 2013, Grenoble, France.
- [14] Ansys Maxwell 3D V.15 – User's Guide, ANSYS Inc. Canonsburg, 2012. 1006 s.
- [15] H.Y. Wang, X.B. Shan, T. Xie: An Energy Harvester Combining a Piezoelectric Cantilever and a Single Degree of Freedom Elastic System [online]. 2012 [cit. 22.4.2013]. ISSN 1673565X. Dostupné z doi: 10.1631/jzus.A1100344
- [16] C. Cristalli, N. Paone, R.M. Rodríguez: Mechanical Fault Detection of Electric Motors by Laser Vibrometer and Accelerometer Measurements [online]. 2006 [cit. 18.4.2013]. Dostupné z: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327005002190
- [17] S. Boisseau, G. Despesse, B.A. Seddik: Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting [online]. Intech 2012 [cit. 18.4.2013]. Dostupné z doi: 10.5772/51360
- [18] D. Quick: New Piezoelectric Device Harvests Wasted Energy From Electronics [online]. Gizmag, 2010 [cit. 18.4.2013] Dostupné z: www.gizmag.com/cantilever-piezoelectric-device/16628/
- [19] Dynamika soustav těles, [online] UMTMB VUT v Brně, 2013 [cit. 5.5.2013]. Dostupné z: www.umt-old.fme.vutbr.cz
- [20] Department of Education – South Wales [online]. 2007 [cit. 18.4.2013] Dostupné z: http://lrrpublic.cli.det.nsw.edu.au/lrrSecure/Sites/Web/physics_explorer/physics/lo/induction_01/induction_01_05.htm
- [21] Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application [online] Cleaning technologies group 2009 [cit. 18.4.2013]. Dostupné z: www.ctgclean.com
- [22] Magsy [online] [cit. 22.4.2013] Dostupné z: www.magsy.cz
- [23] WISE Project [online] [cit. 12.4.2013]. Dostupné z: www.wise-project.org
- [24] ESPOSA Project [online] [cit. 12.4.2013] Dostupné z: www.esposa-project.eu
- [25] Paris Air Show [online] [cit. 10.4.2013] Dostupné z: www.parisairshow.eu
- [26] Airforce World [online] [cit. 10.4.2013] Dostupné z: www.airforceworld.com
- [27] Scopus Database [online] [cit. 12.4.2013] Dostupné z: www.scopus.com
- [28] Z. Hadaš, O. Andrš, V. Větiška, Z. Ančík: Energy Harting Technologies for Special Applications, ICMT 2013, Brno, Czech Republic.